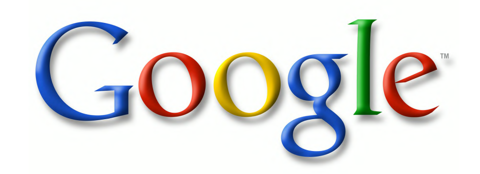
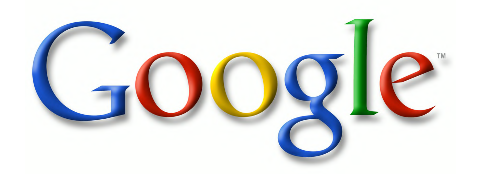
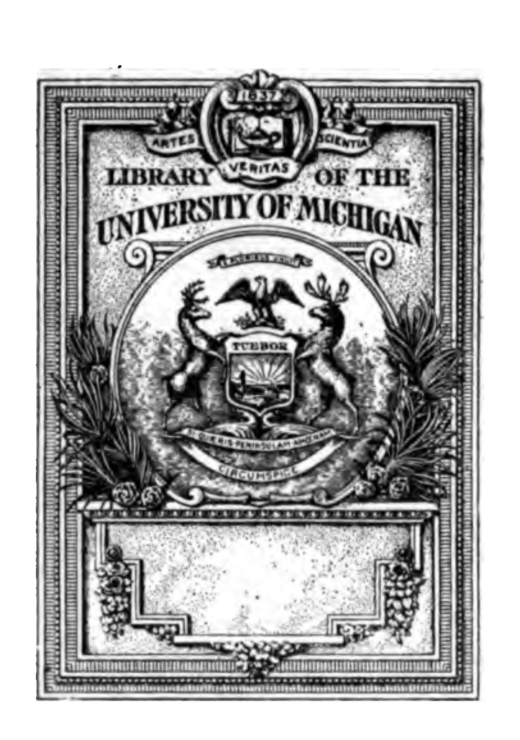
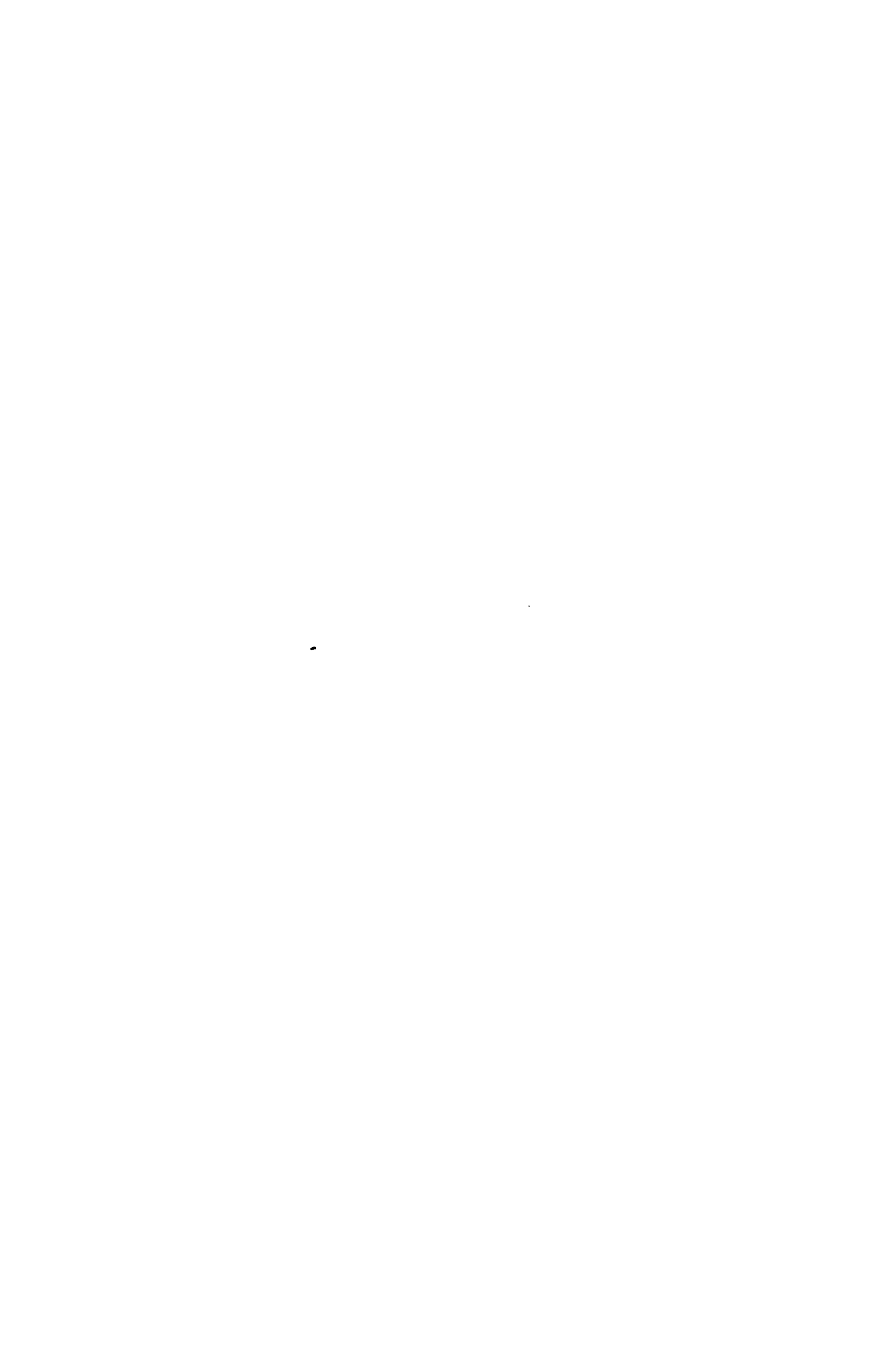





A 814,744


1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
TUEBOR
CIRCUMSPICE



Die Theorie

des

Sehens und räumlichen Vorstellens.

Vom

physikalischen, physiologischen und psychologischen
Standpunkte

aus betrachtet

von

Carl Sebastian Cornelius, 1817 – 1876

Mit 191 Holzschnitten.

Halle,
Druck und Verlag von H. W. Schmidt.
1861.

Vorwort.

Gegenstand der vorliegenden Schrift ist, wie der Titel derselben besagt, die Theorie des Sehens und räumlichen Vorstellens: vom physikalischen, physiologischen und psychologischen Standpunkte aus betrachtet.

Es waren zunächst einige specielle Partien dieser Theorie, so z. B. die Auffassung der Tiefendimension durch den Gesichtssinn, die mir zu weiteren Nachforschungen auf diesem Gebiete Anlass gaben, um mich eben sowohl experimentell, als theoretisch auf demselben möglichst vollständig zu orientiren. Bei dieser Gelegenheit befestigte sich in mir immer mehr die Ueberzeugung, dass nur auf dem Wege einer exacten Psychologie, im Verein mit der Physik und Physiologie, eine allseitige Beleuchtung und durchgreifende Erkenntniss des betreffenden Gegenstandes herbeigeführt werden könne; eine Ueberzeugung, die man wohl mehr oder minder bestimmt bei allen denen voraussetzen darf, die sich näher damit befasst haben. Auch haben in der That die genannten drei Wissenschaften, jede in ihrer Art, die Sache behandelt und so im Verlaufe der Zeit ein reiches Material zu Tage gefördert. Doch findet man in den psychologischen Schriften, mit Ausnahme weniger, nur ganz allgemeine Betrachtungen über das räumliche Vorstellen überhaupt, obschon die physiologischen Bemühungen viele Thatsachen festgestellt haben, die ihre schliessliche Erklärung nur von Seiten der Psychologie finden können, hinwiederum aber auch für die psychische Theorie des Sehens selbst von aufklärender Bedeutung sind. Dagegen sieht man neuerdings in verschiedenen physiologischen Bearbeitungen dieses Gegenstandes das Physikalische mit Sorgfalt berücksichtigt, während das Psychologische natürlicher Weise nur streifend berührt ward. In den physikalischen Lehrbüchern ist es aber schon längst Sitte, neben einer meist

kurzen Andeutung über den Gang der Lichtstrahlen im Auge auch einiges Physiologische und mitunter, allerdings in sehr sporadischer Weise, einige psychologische Momente anzuführen. Für die grösseren Werke dieser Art möchte es vielleicht ganz passend sein, die physikalische Seite des Sehens, nämlich die Dioptrik des Auges, innerhalb gewisser Grenzen vollständig aufzunehmen und dann in wenigen, aber bestimmten Zügen die physiologische und psychologische Seite hervorzuheben, um schliesslich dahin zu weisen, wo das Nähere zu finden ist.

Die physiologische Optik bedarf anerkanntermassen gar sehr der physikalischen; selbst die psychologische Optik kann derselben nicht wohl entbehren. Allein auch die physikalische Optik gewinnt durch die beiden anderen eben genannten Disciplinen in mehr als einer Beziehung an Interesse und Bedeutung, ja bleibt ohne Berücksichtigung derselben in manchem Betracht ganz unverständlich.

So dachte ich mir denn, nachdem ich verschiedene einzelne Partien in der Theorie des Sehens um des besonderen Interesse willen, das sie mir gewährten, verfolgt hatte, dass es Physikern nicht minder als Medicinern und Psychologen willkommen sein dürfte, eine Schrift zu finden, worin alles auf diese Theorie Bezügliche vollständig, aber doch in leicht übersichtlicher Weise dargelegt und nicht allein vom physikalischen und physiologischen, sondern auch vom psychologischen Standpunkte aus behandelt ist.

Theilung der Arbeit kann hier, wie anderwärts, nur von wohlthätigen Folgen sein; aber die isolirten Bestrebungen müssen sich wieder zusammenfinden, und zu einem grösseren innerlich geordnetem Ganzen zusammenfügen, falls ein wahres Wissen über einen Gegenstand, bei dessen gründlicher Behandlung so verschiedene Disciplinen betheiligt sind, zu Stande kommen soll.

Das vorliegende Werk zerfällt nun in drei Hauptabtheilunge in die physikalische, physiologische und psychologische Optik. D erste Abtheilung entwickelt die physikalischen Gesetze des Lich überhaupt und der Farben insbesondere, so weit, als es in er rischer und theoretischer Hinsicht für das Verständniss des N folgenden wünschenswerth erscheinen dürfte. Die zweite en den anatomisch-physiologischen Thatbestand und die physik physiologische Behandlung des Gesichtssinnes. Die dritte beschäftigt sich mit der Psychologie des Sehens und räur

Vorstellens mit Einschluss der räumlichen Auffassung durch den Tastsinn; und zerfällt in zwei Kapitel, von denen das erste die Theorie des Sehens vom Standpunkte der empirischen Psychologie, das zweite dieselbe vom Standpunkte der rationalen Psychologie behandelt. Diese Unterscheidung hat hier die Bedeutung, dass dort der Träger der psychischen Erscheinungen seiner Natur nach ganz unbestimmt gelassen, hier dagegen eine bestimmte Ansicht darüber aufgestellt ist, an die sich eine weitere Theorie des räumlichen Vorstellens anschliesst. Sonst konnten, unabhängig von dieser Ansicht, manche der im zweiten Kapitel vorkommenden Erörterungen ihre Stelle füglich im ersten finden, während umgekehrt die Betrachtungen des ersten Kapitels sich wieder ohne Zwang dem im zweiten Kapitel aufgestellten Erklärungsprincip subsumiren lassen. Doch schien mir die vorgenommene Eintheilung zweckmässig; man möge das erste Kapitel dieser Abtheilung als eine auf empirische Grundlage gestützte Vorbereitung zu den Betrachtungen des zweiten Kapitels ansehen.

In der physiologischen Abtheilung waren psychologische Betrachtungen nicht ganz zu umgehen, daher man solche bei passender Gelegenheit hin und wieder eingestreut finden wird.

Halle im November 1860.

Der Verfasser.

Inhalt.

Erste Abtheilung.

Physikalische Optik.

Zweite Abtheilung.

Physiologische Optik.

Dritte Abtheilung.

Psychologische Optik und Theorie des räumlichen Vorstellens.

Erste Abtheilung.

Physikalische Optik.

Erstes Kapitel.

Gesetze der Lichtfortpflanzung und verschiedener hiermit zusammenhängender optischer Erscheinungen.

1. Während der Tastsinn zur Anregung seiner Thätigkeit eine Berührung des betreffenden Organs mit den äusseren Objecten erfordert, wirkt der Gesichtssinn sozusagen in die Ferne, jedoch nicht unmittelbar, sondern vermöge eines Mittelgliedes, welches unter dem Namen des Lichtes bekannt ist. Freilich ist, was wir Licht nennen, schon eine Empfindung in uns, der aber doch, insofern sie von Aussen her angeregt ist, etwas zum Grunde liegt, das sich von jedem Punkte eines leuchtenden oder beleuchteten Objects strahlenartig im Raume nach allen Richtungen verbreitet und in anderen Körpern, denen es auf seinem Wege begegnet, je nach deren Natur, mancherlei Modificationen erleidet. Hiernach ist das Licht eine äussere physikalische Bedingung des Sehens, und in dieser Bedeutung wollen wir das Wort zunächst gebrauchen.

2. Wenngleich nun von den meisten Körpern, die wir sehen, Licht ausgeht, hat man doch bekanntlich die selbstleuchtenden Körper von den dunklen zu unterscheiden, welche letztere nur vermittelst der ersteren sichtbar werden: sei es durch ihren Gegensatz gegen die leuchtende Umgebung oder durch sogenannte Mittheilung von Licht. Die dunklen Körper können von den selbstleuchtenden zur Lichtentwickelung angeregt oder beleuchtet werden, wodurch sie dann, indem sie das Licht ebenfalls strahlenartig verbreiten, in die Reihe der sichtbaren Körper treten. Doch kann Verschiedenes stattfinden, wenn Licht auf einen an sich dunklen Körper fällt: dasselbe kann entweder durch diesen Körper unbehindert hindurchgehen, oder von ihm ganz zurück-

geworfen, oder drittens in ihm vollständig aufgehalten werden, — oder es kann dies Alles bis zu einem gewissen Grade zumal geschehen, was auch meist in der Wirklichkeit der Fall ist.

Man nennt das in einem Körper aufgehaltene und für das Auge vernichtete Licht absorbirt, die Körper selbst aber, welche das Licht in sehr geringer Menge oder wohl auch gar nicht durchlassen, undurchsichtige Körper im Gegensatze zu den durchsichtigen, die, wie z. B. Luft und Glas, das Licht in grösserer Menge durchlassen. Zwischen beiden stehen die halbdurchsichtigen oder mehr oder minder durchscheinenden Stoffe. Doch zeigen sich sehr dünne Blättchen sogar von undurchsichtigen Körpern durchsichtig oder mindestens durchscheinend, während durchsichtige Körper, wenn ihre Dicke eine gewisse Grenze überschreitet, undurchsichtig werden können, was darauf hindeutet, dass das Licht in diesem Falle während seiner Fortpflanzung innerhalb des sonst durchsichtigen Körpers eine fortgehende Schwächung (Absorption) erfährt.

Gewöhnlich nennt man einen durchsichtigen Körper, welchen also das eindringende Licht mehr oder minder ungeschwächt durchstrahlen kann, ein Medium (Mittel), das um so weniger in die Wahrnehmung des Auges fällt, je ungeschwächter es das Licht durchlässt.

3. Wie ein isolirter leuchtender Punkt, so verbreitet auch jeder Punkt eines leuchtenden Körpers das Licht nach allen Richtungen, und zwar geschieht dies, so lange das Medium durchweg gleichartig (homogen) ist, in geraden Linien, was man leicht schon daraus erkennt, dass ein für das Licht undurchdringlicher Körper die Sichtbarkeit eines anderen nur dann hindert, wenn er von den geraden Linien getroffen wird, die man sich vom Auge nach den Punkten des zu sehenden Körpers gezogen denken kann.

Verbreitet sich das Licht von einem leuchtenden Punkte aus nach allen Richtungen, so muss seine Intensität mit wachsender Entfernung von diesem Punkte abnehmen. Man pflegt dies durch Hindeutung auf den Umstand zu erläutern, dass jede um den leuchtenden Punkt gedachte Kugelfläche alles von ihm ausgehende Licht auffangen müsse. Nun verhalten sich aber verschiedene Kugelflächen wie Quadrate ihrer Halbmesser; daher wird auch die Intensität der Beleuchtung im quadratischen Verhältnisse der Entfernung von dem leuchtenden Punkte abnehmen.

Sämmtliche Punkte einer Kugelfläche, in deren Mittelpunkte sich der leuchtende Punkt befindet, werden senkrecht von den Lichtstrahlen getroffen. Wird nun eine kleine Ebene von Lichtstrahlen, die ein leuchtender Punkt aussendet, senkrecht getroffen, so muss sich die Intensität der Beleuchtung gleichfalls umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung vom leuchtenden Punkte verhalten. Denn der senkrechte Querschnitt des Strahlenkegels, welcher von dem leuchtenden Punkte auf die Fläche fällt, öffnet sich um so mehr oder wird um so grösser, je weiter sich die letztere vom bezeichneten Punkte entfernt, und ist seiner Grösse nach dem Quadrate der Entfernung von diesem Punkte proportional, woraus denn folgt, dass jedes Theilchen der Fläche, bei wachsender Entfernung vom Lichtpunkte, in dem angeführten Verhältnisse weniger Licht empfängt.

Diese im Sinne der Emissions-Theorie gegebene Erläuterung von der Abnahme der Lichtintensität mit wachsender Entfernung von der Lichtquelle lässt sich allenfalls auch nach den Principien der Undulations-Theorie aufrecht erhalten, wenigstens führt die letztere, wie wir später sehen werden, zu demselben Resultate.

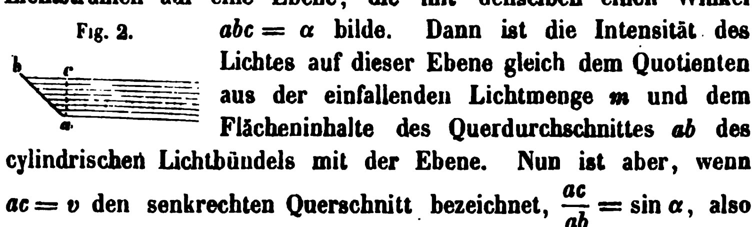
Die Lichtstärke hängt aber nicht allein von der Entfernung der Lichtquelle ab, sondern auch von der Richtung, in welcher die Lichtstrahlen die beleuchtete Fläche treffen. In nebenstehender Figur sieht man eine Fläche *ab*, welche in zwei verschiedenen Stellungen von einem System paralleler Lichtstrahlen getroffen wird. In der einen Stellung fallen die Lichtstrahlen senkrecht, in der anderen schräg auf die Fläche, so dass hier ein grosser Theil der Lichtstrahlen, welche dort die Fläche beleuchten, vorbeigeht. Wird nun eine Ebene von den Lichtstrahlen schief getroffen, so ist unter sonst gleichen Umständen die Stärke der Beleuchtung für jedes Element der Ebene dem Sinus des Winkels proportional, unter welchem die Lichtstrahlen die Ebene treffen.

Fig. 1.

Versteht man, wie häufig, unter der Intensität des Lichtes die absolute Menge desselben, welche auf die Flächeneinheit der Oberfläche eines erleuchteten Körpers fällt, so kann man als Mass dieser Intensität die Zahl benutzen, die erhalten wird, wenn man die auf eine gegebene Ebene fallende Lichtmenge durch den Flächeninhalt der ersteren dividirt. Und hieraus resultirt sofort, dass die Intensität des schräg auffallenden Lichtes dem Sinus des

Winkels proportional ist, welchen die Lichtstrahlen mit der durch sie beleuchteten Oberfläche bilden. Es falle ein Bündel paralleler Lichtstrahlen auf eine Ebene, die mit denselben einen Winkel

Fig. 2.



$abc = \alpha$ bilde. Dann ist die Intensität des Lichtes auf dieser Ebene gleich dem Quotienten aus der einfallenden Lichtmenge m und dem Flächeninhalte des Querdurchschnittes ab des cylindrischen Lichtbündels mit der Ebene. Nun ist aber, wenn $ac = v$ den senkrechten Querschnitt bezeichnet, $\frac{ac}{ab} = \sin\alpha$, also der Flächeninhalt des schiefen Querdurchschnittes $ab = \frac{ac}{\sin\alpha}$, und laut des Vorstehenden die Lichtintensität auf der genannten Ebene $= \frac{m}{\frac{ac}{\sin\alpha}} = \frac{m \sin\alpha}{ac} = \frac{m \sin\alpha}{v}$.

Ist die Lichtquelle nicht ein Punkt, sondern ein Körper, so hängt die Intensitat der Beleuchtung sowohl von der absoluten Intensität der Lichtquelle, nämlich von der jedem Punkte der Lichtquelle eigenthümlichen Stärke des Lichtes, als auch von der Menge der leuchtenden Punkte, d. h. von der Grösse der leuchtenden Oberfläche ab.

4. Man hat nun sehr viele Apparate construirt, die man alle **Photometer** (Lichtmesser) nennt, um die Intensitäten verschiedener Lichtquellen mit einander vergleichen und messen zu können.*) Obschon der Gebrauch dieser Apparate meist sehr einfach

*) S. über photometrische Vorrichtungen: von **Rumford**, Gilbert's Annalen Bd. XLV. S. 349, Bd. XLVI. S. 230; — **Leslie**: Gilb. Ann. Bd. V. S. 253, Bd. X. S. 369, Schweigger's Journ. Bd. XLVI. S. 122, Poggendorff's Annalen Bd. XXXVIII. S. 334; — **Wollaston**: Poggend. Ann. Bd. XVI. S. 328; — **Lampadius**: Schweigg. Journ. Bd. X. S. 124, Bd. XI. S. 361; — **de Maistre**: Biblioth. univers. T. LI. p. 323, Poggend. Ann. Bd. XXIX. S. 187; — **Quetelet**: Bibl. univers. T. LII. p. 212, Poggend. Ann. Bd. XXIX. S. 187; — über Lösung photometrischer Aufgaben s. **Arago**: L'Institut, section de sciences mathématiques, physiques et naturelles. Paris. No. 13. p. 168, Poggend. Ann. Bd. XXIX. S. 191, Bd. XXXV. S. 444; — **Osann**: Poggend. Ann. Bd. XXXIII. S. 419; — **Steinheil**: Göttinger gelehrte Anzeigen 1835. Nr. 34 u. 85, Poggend. Ann. Bd. XXXIV. S. 646; — **Talbot**: Philosophical Magazine and Journal of Science, Ser. III. Vol. V. p. 321: — **Plateau**: Bullet. de l'acad. roy. Bruxelles 1835. No. 2. p. 52. No. 3. p. 89, Poggend. Ann. Bd. XXXV. S. 457; — **Doppler**: Beiträge zur Fixsternkunde. Prag 1846. S. 5, Poggend. Ann. Bd. LXXII. S. 539; — **Bunsen**: Poggend. Ann. LX. S. 403, Bd. LXIII. S. 578, Bd. LXIII. S. 588; — **Masson**: Comptes rendus de séances de

erscheint, ist doch eine genaue Messung der Lichtstärke mit nicht geringen Schwierigkeiten verbunden. Dasselbe Licht macht unter allen Umständen nicht denselben Eindruck auf das Auge, weder bei verschiedenen Menschen noch bei einem und demselben. Auch macht es hierbei einen Unterschied, ob eine und dieselbe Person beide Augen oder nur ein Auge, oder gar abwechselnd das eine und dann das andere gebraucht. Noch grösser wird die Unsicherheit, wenn die mit einander zu vergleichenden Lichtquellen verschiedenfarbiges Licht aussenden. Wir vermögen durch das Auge nicht unmittelbar die Differenz oder das numerische Verhältniss der Helligkeiten zweier verschiedener Lichter anzugeben, sondern eben nur ihre Gleichheit oder Ungleichheit. So können wir wohl mit ziemlicher Sicherheit*) beurtheilen, ob zwei gleich grosse, neben einander befindliche weisse Flächen gleich hell erscheinen. Gesetzt nun, jede dieser Flächen werde von einer besonderen Lichtquelle beleuchtet, in der Art, dass die eine wie die andere Quelle sich in derselben Lage und in gleicher Entfernung der betreffenden Fläche gegenüber befinde; dann werden diese Lichter, falls beide Flächen gleich hell erscheinen, gleiche Intensität besitzen, d. h. gleich stark leuchten. Hierauf stützt sich ein von Ritchie construirtes Photometer, welches noch häufig gebraucht wird und jedenfalls dazu dienen kann, das oben erläuterte Gesetz der Intensitätsabnahme des Lichtes mit wachsender Entfernung von der Lichtquelle auch empirisch festzustellen. Dasselbe besteht (Fig. 3) aus einem runden oder viereckigen Kasten, der beiderseits offen und inwendig geschwärzt ist, und worin zwei auf einander rechtwinklig stehende und gegen die obere Wand des Kastens in einem Winkel von 45° geneigte ebene Papierflächen *a* und *b* angebracht sind, die man durch die Oeffnung *o* sehen kann. Diesen Apparat bringt man

---

l'acad. de sciences, Par. T. XVIII. p. 289, T. XIX. p. 325, Poggend Ann. Bd. LXIII. S. 158 u. 162; — Babinet: s. Dingler's polytechn. Journ. Bd. CXXXI. S. 182; — Foucault: s. ebend. Bd. CXXXVII. S. 54; — Schafhäutl: Abbildung und Beschreibung eines Universal-Vibrations-Photometers. München 1854; — Zöllner: Poggend. Ann. Bd. C. S. 381, 474, 651. Bd. CXI. S. 244. — Eine übers. Darstellung der meisten Photometer nebst Angabe verschied. Versuchsreihen findet sich in Physik. Lexikon, beg. von Marbach, fortg. von C. S. Cornelius, Bd. V. Art. Photometer.

*) Vergl. Steinheil: Elemente der Helligkeitsmessungen am Sternenhimmel in Abhandl. der math. phys. Klasse der königl. bair. Akademie 1837.

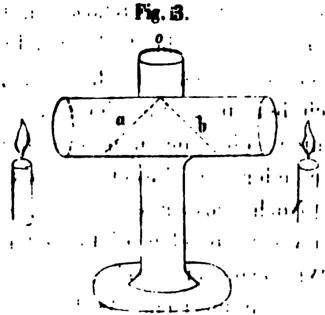


Fig. 3.

zwischen die beiden mit einander zu vergleichenden Lichtquellen, so dass die eine die Fläche *a*, die andere die Fläche *b* beleuchtet, und ändert die Entfernung derselben so lange ab, bis die beiden Papierflächen gleich hell erscheinen. Dann verhalten sich nach dem oben besprochenen Gesetze die Intensitäten dieser Lichtquellen wie die Quadrate ihrer Entfernungen von den beleuchteten Flächen. Betrage die Entfernung des einen Lichtes 6 Fuss, die des anderen 10 Fuss, und seien die betreffenden Intensitäten durch I und I' bezeichnet, so ist $\frac{I}{I'} = \frac{36}{100} = \frac{9}{25}$. Sind in einem anderen Falle die Entfernungen 1 und 2 Fuss, so hat man $\frac{I}{I'} = \frac{1}{4}$, d. h. vier Lichter von der ersten Sorte leuchten ebenso stark als eines von der zweiten. Ist nun das obige Gesetz der Intensitätsabnahme des Lichtes richtig, so müssen die beiden Papierflächen gleich hell erscheinen, wenn man die eine durch ein einziges Licht beleuchtet, welches einen Fuss davon entfernt ist, und das andere durch vier dem ersten g l e i c h e Lichter, die aber zwei Fuss von derselben abstehen. Der Versuch bestätigt dies.

Der Apparat befindet sich auf einem beweglichen Stativ, so dass man ihn bequem in gleiche Höhe mit den Flammen bringen kann. Die letzteren entfernt man bei grösserer Intensität etwa zwanzig bis dreissig Fuss von einander und stellt den Apparat gerade zwischen dieselben, um ihn so lange hin und her zu rücken, bis beide Papierflächen gleich stark beleuchtet erscheinen. Hat man hierbei nach den beiden Lichtquellen hingesehen, so muss man dem Auge vor dem Hinblick auf die Papierflächen einige Ruhe gönnen, damit es seine Empfindlichkeit für schwächere Lichtdifferenzen wieder gewinne. Schwierigkeit bietet die richtige Einstellung des Photometers, wenn beide Lichtquellen nicht dieselbe Farbe besitzen. Bei Vergleichung einer grössern Anzahl von Lichtquellen ist es zweckdienlich, wenn man eine gut brennende, stets ein gleiches Licht gebende Lampe in unveränderter Entfernung als Vergleichungspunkt nimmt und durch einen Gehülfen die Stellung der anderen

Lichtquellen ändern lässt, bis die Beleuchtung beider Flächen gleich hell erscheint.

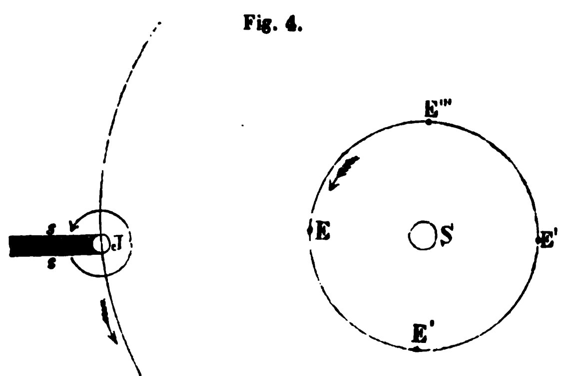
Zur genauern Bestimmung der gleichen Beleuchtung beider Papierflächen bringt man wohl an der Oeffnung *o* noch eine Convexlinse an, um durch dieselbe nach jenen Flächen hinzusehen. Indessen hat man diesem Apparate, ohne Veränderung des Princips, auch noch eine andere Einrichtung gegeben. Im Innern eines vierseitigen Kastens befinden sich anstatt der Papierflächen zwei Planspiegel in derselben Stellung zu einander, wie jene Flächen. Oberhalb dieser Spiegel enthält die Wand des Kastens eine quadratische Oeffnung, die mit einem Streifen matten Glases oder statt dessen mit einem Oelpapier bedeckt und durch einen schwarzen Strich längs der Kante beider Spiegel in zwei gleiche Theile getheilt ist. Die letzteren werden von den durch die Spiegel reflectirten Strahlen beleuchtet. Sonst bleibt das Verfahren ganz das beschriebene, indem man die Entfernungen der zwei mit einander zu vergleichenden Lichtquellen, die ihre Strahlen auf die Spiegel senden, so lange abändert, bis die beiden Hälften des Oelpapiers gleich hell erscheinen. Das letztere kann man durch eine innen geschwärzte Röhre betrachten.

Kommt es nur auf eine ungefähre Vergleichung verschiedener Lichtquellen an, so kann man allenfalls auch ohne besonderen Apparat nach einem bekannten von Rumford angegebenen Verfahren zum Ziele gelangen. Man stellt nämlich in einem sonst dunklen Zimmer vor einer weissen Wand ein undurchsichtiges cylindrisches Stäbchen auf und hinter dasselbe die beiden Lichtquellen L und L'. Dann wird das Stäbchen auf die weisse Wand zwei Schatten werfen, von denen der eine nur durch das Licht L, der andere nur durch das Licht L' beleuchtet ist, während alle übrigen Theile der Wand von beiden Lichtern erhellt sind. Nun besitzen diese Lichter gleiche Intensität, wenn die beiden Schatten des Stäbchens bei gleicher Entfernung der Lichter von der Wand gleich hell oder, was dasselbe ist, gleich dunkel erscheinen. Ist aber der eine Schatten heller beleuchtet als der andere, so entfernt man das stärker leuchtende Licht so weit von der Wand, bis beide Schatten gleich dunkel erscheinen. Die Intensitäten beider Lichter verhalten sich dann wieder zu einander wie die Quadrate ihrer Abstände von der Wand.

5. Obwohl keine Wahrnehmung bei unseren irdischen Lichterscheinungen darauf hindeutet, dass das Licht eine gewisse Zeit erfordert, um von seiner Quelle nach unserem Auge zu gelangen, so ist es doch vollständig erwiesen, dass die Fortpflanzung des Lichtes nicht momentan geschieht, dass es also nicht gleichzeitig am Orte seines Ursprunges und an irgend einem anderen Punkte seiner Fortpflanzungsrichtung auftritt. Das Licht pflanzt sich successiv fort.

Zuerst waren es astronomische Wahrnehmungen, die zu einer numerischen Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes führten. So fand Olav Römer im Jahre 1676 durch Beobachtung der Verfinsterungen, welche die Jupiterstrabanten durch den Schatten ihres Centralplaneten (Jupiter) erfahren, dass das Licht sich in einer Secunde durch einen Weg von 42000 geographischen Meilen fortpflanzt. Da nämlich der Planet Jupiter einen sehr grossen Durchmesser hat, während seine Monde oder Trabanten eine verhältnissmässig geringe Entfernung von ihm haben, so geschieht es, dass diese Monde, mit Ausnahme des entferntesten von ihnen, bei jedem Umlaufe um den Hauptplaneten durch den Schatten desselben gehen und somit verfinstert werden. Der erste Mond, welcher dem Hauptplaneten am nächsten ist, tritt nach stets gleichen Zwischenzeiten aus dem Schatten oder in den Schatten des Jupiter. Nun wird aber der Austritt dieses Trabanten aus dem

Fig. 4.



Schatten *ss* später gesehen, wenn die Erde sich vom Jupiter *J* um eine gewisse Distanz entfernt hat. So lange die Erde bei *E* verweilt, bleibt ihre Entfernung von dem langsam fortschreitenden Jupiter *J* nahe dieselbe, so dass denn auch das von dem Monde

ausgehende Licht, wenn dieser aus dem Schatten des Jupiter eben hervortritt, bei allen Verfinsterungen nahe dieselbe Zeit gebraucht, um zu unserem Auge zu gelangen; wenigstens sind die Zeitdifferenzen noch so unbedeutend, dass sie der Wahrnehmung entgehen. Wenn dagegen die Erde nach E' gekommen ist und sich täglich weiter vom Jupiter entfernt, so erfolgt für uns das Ende der Verfinsterung, d. h. der Austritt des Mondes aus dem Schatten des Hauptplaneten, immer später, weil nämlich jetzt das Licht, welches von diesem Monde im Moment seines Hervortretens aus dem Schatten des Hauptplaneten ausgeht, sich bis zu unserem Auge durch einen längeren Weg fortpflanzen muss. Die Umlaufszeit des Trabanten beträgt nun $42^h\,28'\,35''$, nach deren Verlauf derselbe allemal wieder in den Schatten des Jupiter tritt. Während dieser Zeit entfernt sich aber die Erde, welche binnen 1 Secunde $4^1/_7$ Meilen in ihrer Bahn zurücklegt, um etwa 630000 Meilen vom Jupiter. Das Ende einer Verfinsterung wird dann um etwa 15 Secunden später bemerkt, und dies ist offenbar die Zeit, welche das vom Trabanten ausgehende Licht braucht, um die Entfernung zu durchlaufen, um welche die Erde jetzt weiter vom Jupiter absteht als damals, wo sie bei E verweilte. Wenn sich aber die Erde auf der entgegengesetzten Seite, bei E''', dem Jupiter wieder nähert, so sieht man nun den Anfang jeder folgenden Verfinsterung etwas früher eintreten, und zwar im Verhältniss der stattgehabten Annäherung der Erde zum Jupiter und seinem Trabanten. Da also das Licht den Weg von 630000 geogr. Meilen in 15 Secunden durcheilt, so ist seine Geschwindigkeit, d. h. der Weg, den es in 1 Secunde durchläuft, $\frac{630000}{15} = 42000$ Meilen.

Eine andere astronomische Erscheinung, die unter dem Namen der Aberration bekannt ist, bot ebenfalls ein Mittel zur numerischen Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit dar. Unter Aberration (Abirrung) des Lichtes versteht man aber die durch die Bewegung der Erde in ihrer Bahn und durch die successive Fortpflanzung des Lichtes bewirkte, scheinbare, regelmässig vor sich gehende und jährlich wiederkehrende Ortsveränderung eines Sternes. Der Beobachter, der sich mit der Erde zugleich in ihrer Bahn um die Sonne bewegt, setzt den Stern nach der Richtung dieser Bewegung um einen gewissen Winkel, den man den Aberrationswinkel nennt, vorwärts. Und die Folge hiervon ist, dass alle Fixsterne während eines Umlaufes der Erde um die Sonne

elliptische Bahnen zu beschreiben scheinen, deren grosse, der Ekliptik parallele Axe sich bei allen nahezu als dieselbe constante Grösse herausgestellt hat, die eben durch das Verhältniss der Geschwindigkeit des Lichts zur Geschwindigkeit der Erde bedingt wird, während die kleine Axe und mit ihr die Gestalt dieser elliptischen Bahnen grösser oder kleiner erscheint, je nachdem die einzelnen Gestirne der Ekliptik ferner oder näher stehen. Aus der bekannten Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn um die Sonne und aus der Grösse des durch Beobachtung gegebenen Aberrationswinkels lässt sich nun auch die Geschwindigkeit der successiven Fortpflanzung des Lichtes im Raume berechnen. Da wir hier keine Veranlassung haben, diesen Gegenstand weiter zu verfolgen, so begnügen wir uns mit der Bemerknng, dass die aus der Erscheinung der Aberration abgeleitete Geschwindigkeit des Lichtes dem nach der obigen Methode erhaltenen Resultate im Wesentlichen zur Bestätigung dient. Neuerdings fand Struve, gestützt auf das Phänomen der Aberration, für die Geschwindigkeit des Lichtes 41549 geographische Meilen, mit einem wahrscheinlichen Fehler von höchstens zwei Meilen. Hiernach legt das Licht den Weg von der Sonne nach der Erde in 8′ 17″,78 zurück. Diese Geschwindigkeit kommt, wie es scheint, allem Lichte zu, nicht allein dem der Planeten, sondern auch dem aller Fixsterne.

Die Fortpflanzung des Lichtes ist eine gleichförmige, seine Geschwindigkeit daher eine constante.

6. Endlich hat man auch die Geschwindigkeit des Lichtes gewissermassen direct, mittelst einer geeigneten optischen Vorrichtung, auf der Erdoberfläche selbst bestimmt. Der erste hierher gehörige Versuch wurde von Fizeau*) angestellt, und zwar in folgender Weise:

Man denke sich eine Scheibe, die nach Art der gezahnten Räder am Umfange in gleich grosse, abwechselnd volle und ausgeschnittene, Stücke getheilt ist. Dreht sich nun eine solche Scheibe in ihrer Ebene um den Mittelpunkt ihrer Figur mit grosser Geschwindigkeit, so ist die Zeit, welche während des Vorüberganges eines Zahnes oder eines Zwischenraumes vor einem bestimmten Punkte verfliesst, sehr kurz. Bei 10 und 100 Umläufen

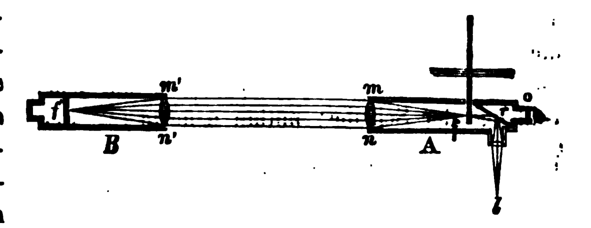
*) Comptes rendus de séances de l'acad. de sciences, T. XXIX. p. 90. — Poggendorff's Annalen, Bd. LXXIX. S. 167.

in der Secunde beträgt sie nur 0,0001 und 0,00001 Secunde; und während dieser kurzen Zeittheilchen durchläuft das Licht ziemlich mässige Strecken, 4 Meilen im ersten, $^1/_4$ Meile im zweiten Falle, wenn man die Geschwindigkeit des Lichtes zu 40000 Meilen annimmt.

Gehe nun ein Lichtstrahl durch die Abtheilungen einer solchen rotirenden Scheibe und werde derselbe, nach seinem Durchgange, mittelst eines Spiegels reflectirt und zur Scheibe zurückgesendet. Geschieht dies so, dass er sie abermals in demselben Punkte des Raumes trifft, so muss er alsdann, vermöge der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes, entweder von einem Zahn der Scheibe aufgefangen oder durch eine Lücke der Zähne durchgelassen werden, je nach der Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe und nach dem Abstande, in welchem die Reflexion stattfindet.

Nun waren zwei Fernröhre, das eine in einem Hause von Sauresnes, das andere auf der Höhe des Montmartre, in einer Entfernung von etwa 8633 Metern so aufgestellt, dass ihre Axen in eine Gerade fielen und ihre Objectivgläser einander zugekehrt waren. Zwischen dem Ocular und Brennpunkte des Objectivs im Fernrohre *A* war unter dem Winkel von 45° gegen die Axe desselben ein durchsichtiges Planglas *p* angebracht, welches den Zweck hatte, das Licht einer Lampenflamme *l* nach seinem Durchgange durch eine Linse gegen den Brennpunkt *f* zu reflectiren. Von

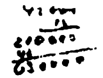
Fig. 5.



hier gelangten die Lichtstrahlen nach der Linse *mn*, traten aus dieser parallel hervor und wurden durch die Linse *m'n'* des zweiten Fernrohres im Brennpunkte *f'* vereinigt. Da sich aber im letzteren ein Planspiegel befand, so wurden die Lichtstrahlen genöthigt, auf demselben Wege nach dem Fernrohre *A* zurückzukehren, um sich hier von Neuem im Brennpunkte *f* zu vereinigen. Der an dieser Stelle erzeugte Lichtpunkt konnte vom Ocular *o* aus durch das Glas *p* hindurch gesehen werden. Endlich war noch in dem Brennpunkte des Fernrohres *A* der gezahnte Umfang einer mit 720 gleichweit abstehenden Zähnen versehenen Scheibe an-

gebracht, die durch ein Räderwerk in schnelle Umdrehung versetzt werden konnte.

Stand nun die Scheibe still und konnte das von l kommende Licht nach seiner Reflexion von p durch eine Zahnlücke hindurchgehen, so erschien es von o aus gesehen wie ein glänzender Stern. Als aber die Scheibe rotirte, sah man den Lichtpunkt, je nach der Rotationsgeschwindigkeit, erglänzen oder gänzlich verschwinden. Bedenkt man, dass das Licht zu seiner Fortpflanzung von f nach f' und von hier wieder zurück nach f einer bestimmten Zeit bedarf, so ergiebt sich leicht, dass der Lichtpunkt nur dann durch das Ocular o andauernd sichtbar sein kann, wenn das Licht bei seiner Zurückkunft in f hier allemal eine Lücke vorfindet, und dass dies von der Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe abhängen muss. Nach den Versuchen von Fizeau trat nun die erste Verfinsterung ein, wenn die Scheibe 12,6 Umläufe in einer Secunde machte. Bei doppelter Rotationsgeschwindigkeit erglänzte der Punkt aufs Neue; bei dreifacher Geschwindigkeit entstand eine zweite Verdunkelung, u. s. f. Reflectiren wir nun auf die erste Verdunkelung, so ergiebt sich, dass das durch eine Lücke gegangene Licht bei seiner Zurückkunft in f durch den nächstfolgenden Zahn der Scheibe aufgehalten wurde. Die Zeit aber, welche bis dahin verfloss, wo dieser Zahn die Stelle der vorigen Lücke einnahm, ist auch gleich der Zeit, welche das Licht zur Fortpflanzung durch die Strecke ff' und wieder zurück bis f gebrauchte. Nun betrug die Breite eines jeden Zahnes, wie die jeder Lücke, $\frac{1}{1440}$ vom Umfange der Scheibe; mithin dauerte es, wenn die Scheibe 12,6 Umläufe in der Secunde machte, $\frac{1}{1440 \,.\, 12{,}6} = \frac{1}{18144}$ Secunde, bis ein Zahn oder auch eine Lücke den Brennpunkt f durchlief. Da aber das Licht, welches durch eine Lücke hindurchging, vom anderen Brennpunkte f' gerade zurückkehrte, während ein Zahn im Punkte f war, so legte das Licht in $\frac{1}{18144}$ Secunde den Weg von $2 \,.\, 8633 = 17266$ Metern zurück. Daraus resultirt nun für die Geschwindigkeit des Lichtes ein Werth von $17266 \,.\, 18144 = 313285304$ Metern oder von 42221 geographischen Meilen in der Secunde, da 7420 Meter = 1 geogr. Meile. Das Mittel aus 28 Versuchen ergab eine Geschwindigkeit von 42526 Meilen in der Secunde, ein Werth, der von dem auf astronomischem Wege gefundenen nicht beträchtlich abweicht.



Das Licht pflanzt sich hiernach in unserer atmosphärischen Luft mit constanter und fast mit derselben Geschwindigkeit wie im Weltraume fort. Hingegen ergaben vergleichende Versuche*), die Fizeau im Verein mit Breguet über die Geschwindigkeit des Lichtes in Luft und Wasser anstellte, dass die Geschwindigkeit des Lichtes in Wasser sich zu der in der Luft wie 3 : 4 verhält. Gleichzeitig, und in ähnlicher Weise (mittelst eines rotirenden Spiegels) von Foucault**) angestellte Versuche über die Geschwindigkeit des Lichtes in Luft und anderen Medien führten zu übereinstimmenden Resultaten. Das Licht pflanzt sich auch im Wasser gleichförmig, aber mit geringerer Geschwindigkeit als in der Luft fort.

7. Wenn Lichtstrahlen sich von einem selbstleuchtenden Körper nach allen Richtungen geradlinig fortpflanzen, ist hinter einem undurchsichtigen Körper, den solche Strahlen treffen, der Lichtquelle gegenüber ein nicht erleuchteter Raum vorhanden, welchen man den Schatten dieses Körpers nennt. Denken wir uns zunächst einen leuchtenden Punkt, so bilden die Lichtstrahlen, welche ein undurchsichtiger Körper von demselben empfängt, einen Lichtkegel, dessen Spitze der leuchtende Punkt selbst ist und dessen jenseits des Körpers liegender Theil den Schatten begrenzt. Falls dieser Körper eine Kugel ist, wird der Schatten die Gestalt eines abgestumpften Kegels haben, dessen kleinere Grundfläche halbkugelförmig vertieft und rings von einem grössten Kreise der Kugel umgeben ist (Fig. 6, 1.). Anders wird die Schattengestalt, wenn an die Stelle des leuchtenden Punktes eine Lichtquelle von grösserer Ausdehnung tritt. Die Gestalt und Grösse des Schattens hängt sowohl von der Gestalt und Grösse des ihn veranlassenden undurchsichtigen Körpers, als auch von der Grösse und Lage des leuchtenden Körpers in Bezug auf den beleuchteten ab, wie man dies an den Schatten bemerken kann, welche die verschiedenen Gegenstände in einem von einem Lichte beleuchteten Zimmer werfen. Die Schatten entsprechen sämmtlich in ihrer Gestalt den Gestalten der Gegenstände, welche sie veranlassen; allein die

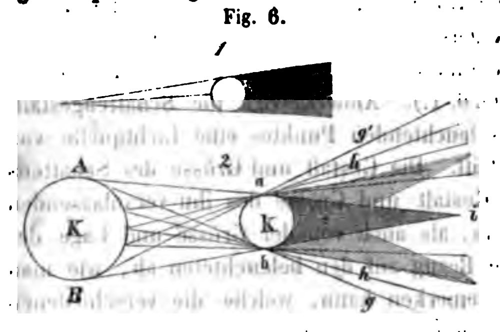
*) Compt. rend. T. XXX. p. 562. 771. Poggend. Ann. Bd. LXXXI. S. 442 und Bd. LXXXII. S. 124.

**) Compt. rend. T. XXX. p. 551. Annales de chimie et physique. T. XLI. p. 129. Poggend. Ann. LXXXI. S. 434.

Schattengestalt dehnt sich bald mehr auseinander, bald zieht sie sich zusammen, bald begiebt sich der Schatten auf die eine, bald auf die andere Seite des Gegenstandes, je nachdem die Stellung des Lichtes verändert wird. In jeder Stellung wird man sich aber die Gestalt, Lage und Grösse des Schattens leicht erklären können, wenn man die Art und Weise betrachtet, wie für den gegebenen Fall das sich geradlinig fortpflanzende Licht von dem undurchsichtigen Körper abgehalten werden muss. Der Schatten wird uns gewöhnlich auf Flächen sichtbar, welche selbst beleuchtet sind und von denen durch den Schatten werfenden Körper nur ein Theil des sie sonst beleuchtenden Lichtes abgehalten wird. Nun kann aber der Schatten eines und desselben Körpers sehr verschieden ausfallen, je nach der Stellung des letzteren zu dem Körper, auf dem der Schatten erscheint, wovon man sich leicht überzeugt, wenn man den Schatten eines Körpers mit einer Tafel auffängt, deren Stellung sich verändern lässt.

Ist *K* eine leuchtende Kugel und *k* eine kleinere undurchsichtige, so wird nur der vordere Theil der letzteren, welcher der Kugel *K* zugewendet ist, beleuchtet werden können; allein der Schatten kann in diesem Falle nicht wie dort, wo an der Stelle von *K* ein leuchtender Punkt befindlich ist, die Gestalt eines abgestumpften Kegels haben. Jeder Punkt der Kugel *K* verbreitet

Fig. 6.



nach allen Richtungen geradlinige Lichtstrahlen. Die Punkte *A* und *B*, welche in einem grössten Kreise um *K* liegen, sind die äussersten Punkte der leuchtenden Kugel, von denen noch Lichtstrahlen nach der Kugel *k* gelangen können. Von diesen und von allen Punkten auf der gegen *k* gewendeten Halbkugel von *K* verbreiten sich Strahlen nach *k*. Alle auf die letztere fallenden Strahlen werden abgehalten, in den Raum hinter *k* zu gelangen. Während aber nach *g*, *g* von allen Punkten der bezeichneten Halbkugel von *K* Licht kommt, werden von dem Raume *h*, *h* viele, aber nicht alle Strahlen, und endlich von dem Raume *s* alle Strahlen abgehalten. Dieser Raum *s*, der

gar kein Licht von Seiten der Kugel *K* empfängt, wird begrenzt durch die Strahlen der äussersten Punkte im grössten Kreise, worin *A* und *B* liegen, und ist daher ein Kegel, der bei *i* seine Spitze und seine Grundlinie in einem grössten Kreise *ab* um *k* hat. Dieser Schatten wird der Kernschatten der Kugel *k* genannt, während man den Raum zu beiden Seiten desselben, in den noch einiges Licht gelangt, den Halbschatten der Kugel nennt, der sowohl gegen seinen Rand hin, als auch je weiter er sich von *k* entfernt, immer heller wird. Beide Schatten, der Kern- und Halbschatten, gehen allmälig in einander über, so dass sie meist nur nahe hinter dem Schatten werfenden Körper einigermassen scharf begrenzt sind. — In ganz ähnlicher Weise kann man auch den Schatten für jeden anderen Körper finden, mag übrigens der leuchtende oder beleuchtete Körper der grössere sein.

So beruht also die Schattenbildung im Wesentlichen auf dem Umstande, dass das Licht sich geradlinig fortpflanzt. Doch erfährt das Licht bei seinem Vorübergehen am Rande des Schatten werfenden Körpers stets eine sogenannte Beugung oder Inflexion, vermöge deren gebeugte Lichtstrahlen, die allerdings viel schwächer als die directen sind, in den Raum des Kernschattens gelangen können.

Die Schatten erscheinen des Nachts bei Kerzenlicht gewöhnlich dunkler als am Tage, wo der Schatten eines Körpers meist in den beleuchteten Raum eines anderen fällt. Sonst erscheint der Schatten um so dunkler, je stärker der ihn umgebende Raum beleuchtet ist, weshalb denn auch das stärkste Licht den dunkelsten Schatten bewirkt.

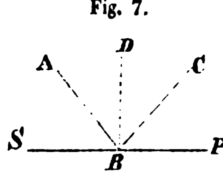
Wird aber ein Körper von mehreren Lichtquellen zugleich beleuchtet, so zeigt er auch ebenso viele Schatten als Lichtquellen vorhanden sind; allein jeder dieser Schatten rührt nur von einer Lichtquelle her und wird durch die anderen beleuchtet. Senden nun die verschiedenen Lichtquellen verschiedenfarbiges Licht aus, so kann der Schatten, welcher von einem farbigen Lichte beleuchtet wird, in der Farbe dieses Lichtes erscheinen, obwohl dabei auch sogenannte subjective Farbenerscheinungen auftreten können.

8. Ein Lichtstrahl pflanzt sich in einem Medium, das in allen seinen Punkten dieselbe physikalische Beschaffenheit darbietet, gleichförmig und geradlinig fort; trifft derselbe aber auf die Grenzebene eines anderen Mediums, so erfährt er meist eine Veränderung

seiner Richtung und Intensität. Ein Theil des auffallenden Lichtes kehrt nämlich in das vorige Medium zurück, während ein anderer Theil in das neue Medium eindringt. Dabei haben beide Theile, sowohl der ins vorige Mittel zurückkehrende als auch der ins neue Mittel eindringende, eine andere Richtung als der ursprüngliche Lichtstrahl, falls dessen Richtung schief gegen die Trennungsfläche beider Medien war. Man nennt jenen Strahl, welcher in das alte Mittel zurückkehrt, den reflectirten, den anderen, welcher in das neue eindringt, den gebrochenen Strahl. Betrachten wir zunächst jenen.

Es sei *SP* eine reflectirende Ebene, etwa ein Spiegel, welche der Strahl *AB* im Punkte *B* treffe. Dann heisst dieser Punkt der Einfallspunkt, eine in ihm errichtete Senkrechte *BD* das Einfallsloth, der Winkel *ABD*, welchen der einfallende Strahl mit dem Einfallsloth macht, der Einfallswinkel, die Ebene, worin das Einfallsloth und der einfallende Strahl liegen, die Einfallsebene, und endlich der Winkel, den der reflectirte Strahl *BC* mit dem Einfallsloth *BD* einschliesst, der Reflexionswinkel.

Fig. 7.



Theorie und Erfahrung haben nun nachstehendes Reflexionsgesetz zur Evidenz gebracht. 1) Der reflectirte Strahl liegt mit dem einfallenden Strahle in einer und derselben Ebene, d. h. in der Einfallsebene. 2) Der Reflexionswinkel *DBC* ist gleich dem Einfallswinkel *ABD*.

Von dem auf diese Weise regelmässig reflectirten Lichte haben wir das unregelmässig reflectirte oder zerstreute Licht zu unterscheiden. Eine spiegelnde Oberfläche von absoluter Glätte würde uns nur das Bild des vor ihm stehenden Gegenstandes in Folge regelmässiger Reflexion, je nach der Stellung des Gegenstandes, in einer bestimmten Richtung zeigen, ohne selbst sichtbar zu sein. Die verschiedenen Theilchen an der Oberfläche eines Körpers nehmen wir aber nur insofern wahr, als sie das empfangene Licht nach allen Richtungen reflectiren, d. h. zerstreuen, was um so mehr geschieht, je rauher die reflectirende Oberfläche ist. Mag nun eine Fläche auch noch so wohl polirt sein, es findet dennoch neben der regelmässigen Reflexion zugleich eine, wenn auch verhältnissmässig nur geringe, Zerstreuung des Lichtes statt.

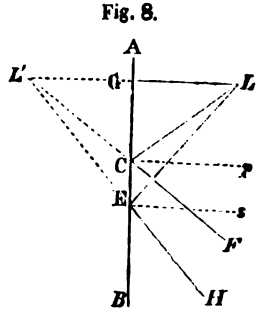
Eine spiegelnde Fläche, die möglichst viel Licht regelmässig reflectiren soll, muss natürlich möglichst undurchsichtig sein und überdies noch eine sehr feine Politur zulassen. Metalle sind darum zu Spiegeln sehr geeignet; doch gebraucht man gewöhnlicher Glasspiegel. Nun giebt aber ein durchsichtiger Körper mit glatter Vorder- und Hinterfläche zwei matte Bilder, indem sowohl beim Ein- als auch beim Austreten des auffallenden Lichtes ein Theil des letzteren reflectirt wird, nämlich an der Vorder- und Hinterfläche. Macht man aber die Hinterfläche undurchsichtig, entweder durch Mattschleifen oder durch Aufstreichen einer schwarzen Farbe, so giebt diese Fläche ein matteres Bild als die vordere. Belegt man dagegen die Hinterfläche des Glases, wie gewöhnlich, mit Metallfolie (Zinnamalgam), so giebt hier die Reflexion des Lichtes am Metall das hellste Bild, welches man dann auch vorzugsweise wahrnimmt.

Es ist bekannt, dass auch Flüssigkeiten (Wasser, Quecksilber) durch Reflexion der Lichtstrahlen, zumal bei ruhiger Oberfläche, Spiegelbilder gewähren.

9. Nach dem oben aufgestellten Reflexionsgesetze kann man nun leicht die Lage des Bildes bestimmen, welches ein Planspiegel von einem vor seiner Ebene liegenden Punkte oder Gegenstande zeigen muss.

Sei AB der Durchschnitt des Spiegels und L der Punkt, welcher Lichtstrahlen auf denselben sendet. Der Strahl LG falle senkrecht auf AB; in den Einfallspunkten C und E der schief auffallenden Strahlen LC und LE seien aber die Einfallslothe Cp und Es gezogen. Während nun der senkrechte Strahl LG in sich selbst zurückkehrt, werden die Strahlen LC und LE nach Richtungen reflectirt, die sich ergeben, wenn man den Winkel $pCF = \angle LCp$ und Winkel $sEH = \angle LEs$ macht. Denkt man sich jetzt die reflectirten Strahlen hinter dem Spiegel verlängert, so werden sie sich in einem Punkte L', der in der verlängerten LG liegt, schneiden. Es ist aber, wegen der Congruenz der Dreiecke CGL und CGL', die Linie $LG = GL'$. Da dies nun von allen Strahlen gilt, die von dem leuchtenden Punkte L ausgehen und vom Spiegel re-

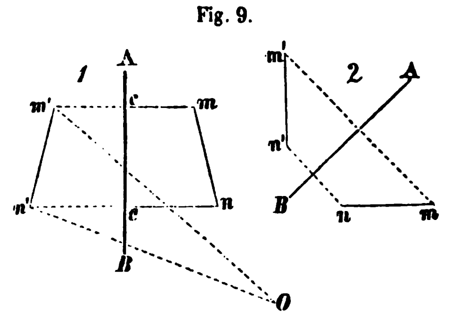
Fig. 8.



flectirt werden, so erscheint uns, die wir die reflectirten Strahlen in unser Auge aufnehmen, das Bild des Punktes L in L', d. h. so als ob die reflectirten Strahlen von einem Punkte herkämen, der ebenso weit hinter dem Spiegel als der leuchtende Punkt vor demselben liegt.

Ebenso verhält es sich mit den verschiedenen Punkten eines Objects, dessen Bild uns so weit hinter dem Spiegel erscheint als es selbst, das Object, vor demselben steht. Bezeichnet AB (Fig. 9 Nr. 1)

Fig. 9.



wieder den Durchschnitt eines Spiegels und mn ein vor ihm befindliches Object, so erhält man nach dem Vorstehenden die Spiegelbilder der Punkte m und n, wenn man von diesen Punkten aus Perpendikel auf den Spiegel fällt und sie so weit verlängert, dass $m'c = mc$ und $n'e = ne$ wird. In derselben Weise ergeben sich die Bilder der zwischenliegenden Punkte. Das Auge in O sieht also das Spiegelbild $m'n'$, das dieselbe Neigung gegen die Ebene des Spiegels und auch dieselbe scheinbare Grösse hat, wie das Object. Nur ist das, was am letzteren rechts ist, im Bilde links, und umgekehrt.

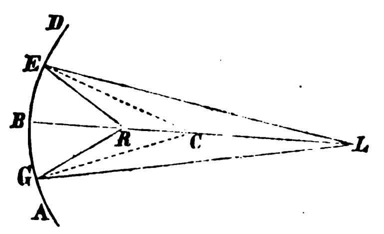
Dieselben Gesetze gelten für alle Bilder, die von irgend welchen Objecten, deren Licht auf den Spiegel fällt, vermittelst der von ihm reflectirten Strahlen in unserem Auge erzeugt werden. Immer erhält man die Lage des Spiegelbildes eines beliebigen Objectpunktes, wenn man vom letzteren auf die Ebene des Spiegels oder deren Erweiterung eine Senkrechte zieht und diese jenseits so weit verlängert, bis ihre beiden durch die Spiegelebene getrennten Stücke gleich gross sind. Diese Ebene halbirt auch den Winkel, welchen Object und Bild mit einander machen. Ist nun ein Planspiegel (Fig. 9. Nr. 2) um 45° gegen den Horizont geneigt, so erscheint ein auf dem letzteren senkrecht stehendes Object $m'n'$ im

ersteren horizontal und ein horizontales Object *mn* senkrecht. Dagegen erscheint in einem vertikal gestellten Planspiegel ein horizontales Object horizontal und in einem horizontal liegenden Spiegel ein vertikaler Gegenstand vertikal. Ein Beispiel für den letzteren Fall bietet die Spiegelung der Gegenstände auf einer ruhigen Wasserfläche.

10. Das obige Reflexionsgesetz des Lichtes findet auch Anwendung bei gekrümmten Spiegeln, zu denen die sphärischen, parabolischen, elliptischen und hyperbolischen Spiegel, sowie auch die Cylinder- und Kegelspiegel gehören. Die sphärischen Spiegel, die wir hier näher betrachten wollen, sind entweder Concav- oder Convex-Spiegel, je nachdem die spiegelnde Fläche von einem Theile der inneren oder äusseren Oberfläche einer Kugel gebildet wird. Wenn nun, wie gewöhnlich, der sphärische Spiegel kreisförmig begrenzt ist, heisst die Linie, welche durch die Mitte des Spiegels und den Mittelpunkt der zugehörigen Kugel geht, die Hauptaxe desselben. Auch nennt man nicht selten die Mitte des Spiegels den optischen Mittelpunkt und den Mittelpunkt der Hohlkugel, von welcher der Spiegel ein durch eine Ebene abgeschnittenes Stück ist, den geometrischen oder Krümmungs-Mittelpunkt.

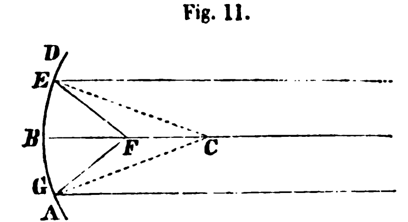
ABD ist der Durchschnitt eines Hohlspiegels, *B* der optische, *C* der geometrische Mittelpunkt, und *LCB* die Hauptaxe. Sei nun *L* ein leuchtender Punkt in der Axe, der Lichtstrahlen auf den Spiegel sendet, und von *C* aus eine Linie nach dem Punkte *E* gezogen, wo ein Lichtstrahl auffällt; dann steht dieselbe als Halbmesser der zugehörigen Kugel senkrecht auf der spiegelnden Fläche und ist somit eine Linie, die wir als Einfallsloth kennen gelernt haben. Fällt nun der Lichtstrahl *LE* unter dem Winkel *LEC* mit dem Einfallsloth auf den Spiegel, so erhält man die Richtung des reflectirten Strahles *ER*, wenn man den Winkel *CER* gleich dem Einfallswinkel *LEC* macht. Dagegen wird ein Strahl in der Richtung der Hauptaxe *LB*, der also senkrecht auf den Spiegel fällt, in sich selbst reflectirt, während alle Strahlen, welche den Spiegel in Punkten treffen, die mit *B* in demselben Kreis-

Fig 10.



umfange liegen, nach der Reflexion ihre Vereinigung im Punkte *R* finden, wo dann auch das Bild des leuchtenden Punktes liegt. Ist aber der letztere so weit entfernt, dass die von ihm herkommenden Strahlen in paralleler Richtung auf den Spiegel fallen, so vereinigen sich die reflectirten Strahlen in einem Punkte *F*, der in der Mitte zwischen dem optischen und geometrischen Mittelpunkte liegt. Man nennt diesen Punkt den **Hauptbrennpunkt** und seinen Abstand *FB* vom Spiegel die **Brennweite**, die also gleich der Hälfte vom Halbmesser der Halbkugel ist, von welcher der Spiegel einen Abschnitt bildet. Diese Brennweite kann man durch Rechnung, aber auch durch Beobachtung finden, wenn man Sonnenstrahlen parallel mit der Achse einfallen lässt und die Stelle sucht, wo sich das Sonnenbild am reinsten und hellsten auf einer kleinen senkrecht gegen die Axe gehaltenen Ebene zeigt.

Fig. 11.



Fallen die Strahlen möglichst nahe am optischen Mittelpunkte *B*, also unter möglichst kleinem Winkel mit der Hauptaxe *LB* auf den Spiegel (Fig. 10 S. 21), so lässt sich die Lage des Vereinigungspunktes der reflectirten Strahlen in Bezug auf die Lage des leuchtenden Punktes leicht mit Hilfe der Formel $\frac{1}{a} + \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{f}$ übersehen, wo a den Abstand *LB* des leuchtenden Punktes von der Mitte *B* des Spiegels, α die Entfernung des Bildes oder des Vereinigungspunktes der reflectirten Strahlen von demselben und f die Brennweite für parallele Strahlen bezeichnet.

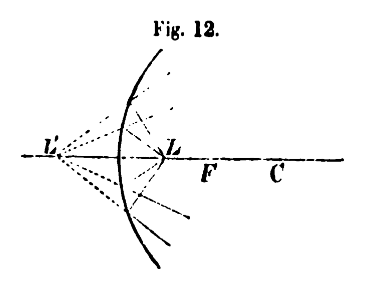
Das Dreieck *LER* giebt nämlich, da der Winkel *LER* durch *EC* halbirt wird, die Proportion: $LE : ER = LC : CR$. Wegen der vorausgesetzten Kleinheit des Winkels *CEB* ist aber auch ohne merklichen Fehler $LE = LB = a$ und $RE = RB = \alpha$; daher durch Einführung der Buchstabenwerthe in jene Proportion: $a : \alpha = a - 2f : 2f - \alpha$, wo $CB = 2f$ gesetzt ist. Aus dieser Proportion folgt die Gleichung: $a(2f - \alpha) = \alpha(a - 2f)$ oder, wenn man durch $a.\alpha.f$ dividirt, $\frac{1}{a} + \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{f}$, und hieraus $\alpha = \frac{af}{a-f}$.

Setzt man $a = 2f$, so wird auch $\alpha = 2f$, d. h. wenn der leuchtende Punkt im geometrischen Mittelpunkte *C* des Spiegels

steht, so fallen alle Strahlen senkrecht auf den Spiegel und werden auch wieder nach diesem Mittelpunkte reflectirt. Rückt aber der leuchtende Punkt dem Spiegel näher, so vereinigen sich die reflectirten Strahlen erst jenseits des Mittelpunktes.

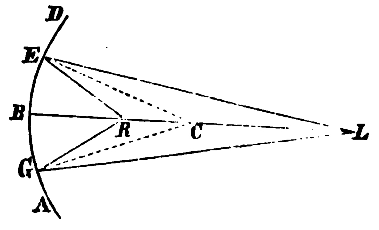
Ist $a = f$, so wird nach obiger Formel α unendlich gross, d. h. wenn der leuchtende Punkt im Hauptbrennpunkte F steht, so werden die Strahlen parallel mit der Achse reflectirt und darum gar nicht vereinigt (Fig. 11). Hat man a kleiner als f, wo der leuchtende Punkt L zwischen dem Spiegel und Hauptbrennpunkte F liegt, so erhält α einen negativen Werth, welcher anzeigt, dass die Strahlen so reflectirt werden, als ob sie von einem Punkte L' hinter dem Spiegel herkämen.

Fig. 12.



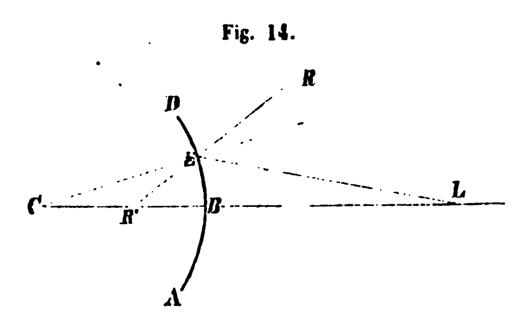
Die bisherigen Betrachtungen gelten, wie bemerkt, nur für Strahlen, die der Axe sehr nahe auf den Spiegel fallen. Je grösser die Winkel ECB und ELB sind, desto näher kommt der Vereinigungspunkt der reflectirten Strahlen dem Spiegel selbst zu liegen. Auch ist es nur unter Voraussetzung einer kleinen Oeffnung CEG des Spiegels richtig, dass der Hauptbrennpunkt (für parallele Strahlen) in der Mitte zwischen dem optischen und geometrischen Mittelpunkte des Spiegels liegt. Strahlen, die von einem leuchtenden Punkte in der Axe in grösserer Entfernung vom optischen Mittelpunkte B auf den Spiegel fallen, haben nach ihrer Reflexion einen anderen Durchschnittspunkt mit der Axe als die näher einfallenden. Daher findet nun eine Vereinigung aller reflectirten Strahlen in einem Punkte nicht mehr statt, sondern es entsteht, indem je zwei nächste reflectirte Strahlen sich durchschneiden, aus der Folge solcher Durchschnittspunkte eine leuchtende Linie, die man gewöhnlich Brennlinie nennt.

Fig. 13.



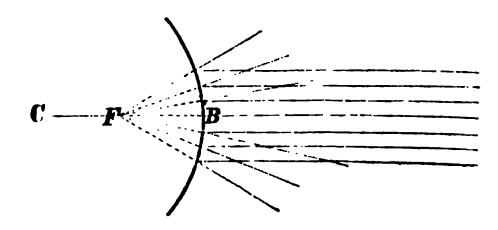
11. Ist ABD der Durchschnitt eines Convexspiegels, B der optische, C der geometrische Mittelpunkt und CB die Hauptaxe desselben, so wird ein Strahl, der von dem leuchtenden Punkte

Fig. 14.



L in der Richtung LB auf den Spiegel fällt, in dieser Richtung auch wieder reflectirt, während ein anderer Strahl LE, für welchen CE das Einfallsloth ist, in der Richtung ER zurückgeworfen wird, so als ob der reflectirte Strahl von R' herkäme. Wenn aber der Halbmesser CB im Vergleich zur Entfernung des leuchtenden Punktes vom Spiegel verschwindend klein ist, fallen die Strahlen in paralleler Richtung auf den Convexspiegel und die reflectirten

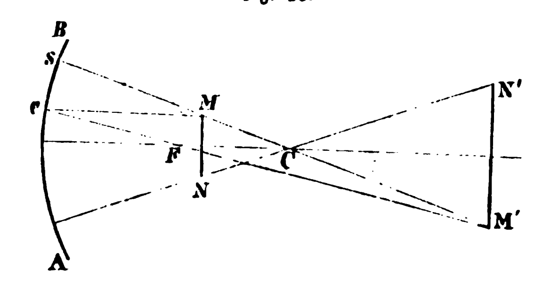
Fig. 15.



Strahlen convergiren nach einem Punkte F hinter dem Spiegel, der in der Mitte zwischen dem optischen und geometrischen Mittelpunkte liegt. Da nun die reflectirten Strahlen aus diesem Punkte herzukommen scheinen, ohne dass sie hier vereinigt werden, so nennt man denselben den negativen oder scheinbaren (imaginären) Brennpunkt. Für Convexspiegel giebt es also keinen Punkt, in welchem die auffallenden Strahlen nach der Reflexion vereinigt werden. Die obige Formel (S. 22) gilt aber auch für Convexspiegel, wenn man nur f negativ nimmt. Man hat dann $\alpha = -\frac{af}{a+f}$. Diese Formel giebt für jeden positiven Werth von a einen negativen für α, was eben die Bedeutung hat, dass die auf den Convexspiegel fallenden Strahlen so reflectirt werden, als ob sie von einem Punkte hinter dem Spiegel herkämen.

12. Nach dem Vorstehenden lassen sich leicht die Bilder construiren, welche die von einem Gegenstande ausgehenden Strahlen nach ihrer Reflexion von einem sphärischen Spiegel *AB* geben. Steht der Gegenstand *MN* zwischen dem geometrischen Mittelpunkte *C* und dem Hauptbrennpunkte *F*, so wird der vom Punkte

Fig. 16.

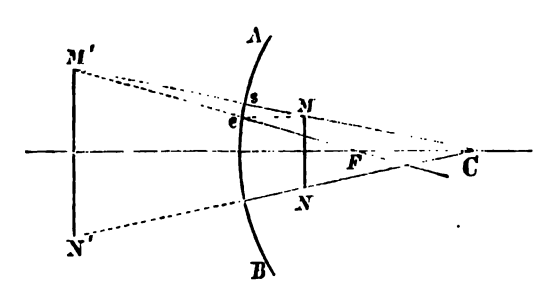


M senkrecht auf den Hohlspiegel fallende Strahl *Ms* in der Richtung *sM*, der mit der Axe parallele Strahl *Me* aber nach dem Brennpunkte *F* reflectirt. Beide Strahlen schneiden sich in *M'*, und hier ist also das Bild des Punktes *M*. In derselben Weise ergiebt sich das Bild *N'* des Objectpunktes *N*. Man erhält daher in diesem Falle ein umgekehrtes, vergrössertes Bild des Gegenstandes jenseits des Mittelpunktes *C*. Wäre dagegen *M'N'* der Gegenstand, so würden die von ihm ausgehenden Strahlen nach der Reflexion das Bild *MN* erzeugen, so dass also ein Gegenstand jenseits des Mittelpunktes *C* ein verkehrtes, verkleinertes Bild zwischen dem Brennpunkte *F* und dem Mittelpunkte *C* des Hohlspiegels giebt.

Weil nun diese Bilder durch eine wirkliche Vereinigung der reflectirten Lichtstrahlen entstehen, kann man sie auf einem Schirme von weissem Papier oder mattgeschliffenem Glase auffangen, wo sie dann ihr Licht gleich einem leuchtenden Gegenstande nach allen Richtungen verbreiten. Daher nennt man sie auch, im Gegensatze zu gewissen anderen Bildern, Sammel- oder physische Bilder.

Steht der Gegenstand zwischen dem Spiegel und Hauptbrennpunkte *F* (Fig. 17), so erscheint sein Bild *M'N'* hinter dem Spiegel. Denn der senkrecht auf den Spiegel fallende Strahl *Ms* wird in der Richtung *MC*, der mit der Axe parallele *sMe* aber nach dem Brennpunkte *F* reflectirt. Beide Strahlen divergiren also nach ihrer Reflexion und werden sich rückwärts verlängert im Punkte *M'*

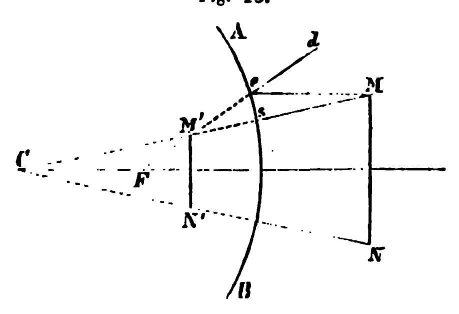
Fig. 17.



schneiden, wo uns auch das Bild von *M* erscheinen wird. Das Bild des Punktes *N* erscheint in derselben Weise in *N'*. So gewährt uns also ein Gegenstand zwischen dem Spiegel und dem Hauptbrennpunkte *F*, wenn die vom Spiegel reflectirten Strahlen in unserem Auge vereinigt werden, ein aufrechtes, vergrössertes Bild hinter dem Spiegel, das man, im Gegensatze zu jenen physischen Bildern, die sich wie leuchtende Objecte verhalten, ein geometrisches oder virtuelles Bild nennt.

Convexspiegel geben nun stets virtuelle Bilder. Steht der Gegenstand *MN* vor dem Convexspiegel *AB*, so wird der senk-

Fig. 18.



recht auffallende Strahl *Ms* in der Richtung *sM* reflectirt, der zur Axe parallele *Me* aber nach der Richtung *ed* so, als ob er von dem scheinbaren Brennpunkte *F* (jenseits des Spiegels) herkäme. Indem nun die reflectirten Strahlen rückwärts verlängert sich im Punkte *M'* schneiden, erscheint dem Auge das Bild des Punktes *M* in *M'*. Ebenso ist es mit den Bildern der übrigen Punkte des Objects. Ein Convexspiegel giebt also aufrechte, verkleinerte Bilder hinter der spiegelnden Oberfläche.

13. Wenn Licht auf einen durchsichtigen Körper fällt, wird ein Theil desselben nach den bereits erörterten Gesetzen reflectirt, während ein anderer Theil den Körper durchstrahlt. Bezeichnet in der nachstehenden Figur 19 *EG* die Trennungsebene zweier Medien, etwa von Luft und Wasser oder Glas, und fällt auf dieselbe im Punkte *B* ein Lichtstrahl *AB*, so ist die Senkrechte *SB* das Einfallsloth, welches durch das neue Medium hindurch verlängert, mit dem in dieses Medium eindringenden Strahl einen Winkel machen kann, der entweder kleiner oder grösser als der Einfallswinkel *ABS* ist. Nun versteht man unter Brechung des Lichtes eben die Richtungsänderung, welche der in das neue Mittel eindringende Strahl in Rücksicht des auffallenden Strahles erfährt. Ist daher *BD* die Richtung des gebrochenen Strahles, so nennt man den Winkel, welchen dieser Strahl mit dem Lothe *BR* macht, den Brechungswinkel.

Zieht man von *B* aus mit einem beliebigen auf *BA* genommenen Halbmesser *BO* einen Kreis, und fällt von den Punkten *O* und *C*, wo dieser Kreis den einfallenden und gebrochenen Strahl schneidet, die Perpendikel *OM* und *CN* auf das Loth *SR*; so besteht zwischen diesen beiden Linien, so lange das brechende Mittel dasselbe bleibt, ein gewisses, unveränderliches (constantes) Verhältniss, das unabhängig von der Neigung des einfallenden Strahles *AB* gegen das Einfallsloth ist. Weil man nun in der Trigonometrie die Linie *OM* den Sinus des Winkels *OBM* und *CN* den Sinus des Winkels *CBR* nennt, so spricht man das eben hervorgehobene Brechungsgesetz folgendermassen aus: „Für dasselbe brechende Medium ist das Verhältniss des Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels constant und unabhängig von der Neigung des einfallenden Strahles gegen das Einfallsloth." Bezeichnet man den Einfallswinkel durch x, den Brechungswinkel durch y, so kann man allgemein $\frac{\sin x}{\sin y} = n$ setzen, wo n eine constante Zahl ist, die man den Brechungsexponenten (Brechungsquotienten) oder auch den Brechungsindex nennt.

Fig. 19.

Man hat diese Brechungsexponenten nach verschiedenen Methoden für eine gewisse Anzahl durchsichtiger Medien ermittelt und in besonderen Tabellen zusammengestellt. Kennt man aber den Brechungsquotienten, so lässt sich leicht der Weg bestimmen, den ein Lichtstrahl in einem Medium vermöge der Brechung einschlagen wird. Geht z. B. ein Lichtstrahl aus Luft in Wasser über, so ist der Brechungsexponent nahe $^4/_3$. Man theile nun die auf *SR* senkrechte *OM* (Fig. 18) in vier gleiche Theile, trage drei solcher Theile von *B* aus auf die Linie *BG*, und ziehe dann durch den dritten Theilungspunkt eine Parallele *PC* zu *SR*. Schneidet nun diese Linie den Kreis etwa im Punkte *C*, so ziehe man von *B* aus die Gerade *BC*, welche die Richtung des gebrochenen Strahles angiebt, insofern $\frac{OM}{CN} = \frac{4}{3}$. Geht der Lichtstrahl *CB* aus Wasser in Luft über, so wird derselbe, da dann nach dem Brechungsgesetze $\frac{CN}{OM} = \frac{3}{4}$ ist, in der Richtung *BA* gebrochen.

14. Ist der Einfallswinkel $x = 0$, so ist auch $y = 0$, d. h. wenn ein Lichtstrahl senkrecht auf die Oberfläche eines Mittels fällt, so geht derselbe ungebrochen hindurch. Für n grösser als 1 ist $\sin x$ grösser als $\sin y$. In diesem Falle, wo also der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel ist, pflegt man zu sagen, dass der Strahl gegen das Einfallsloth zu gebrochen werde

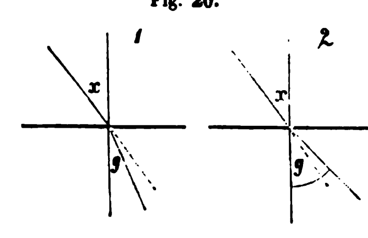
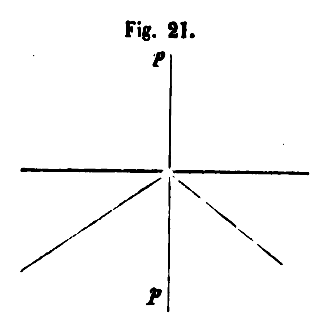


Fig. 20.

(Fig. 20 N. 1). Ist dagegen n kleiner als 1, so ist auch x kleiner als y, und man sagt, der Strahl werde vom Einfallsloth hinweggebrochen (Nr. 2). Der grösste Einfallswinkel ist der von 90°; es ist dann $\sin x = \sin 90^0 = 1$, und aus $\frac{\sin x}{\sin y} = n$ wird $\sin y = \frac{1}{n}$. Geht ein Lichtstrahl unter diesem Winkel aus Luft in Wasser über, so ist $\sin y = \frac{3}{4} = 0{,}75$, wozu der Winkel von 48° 35′ gehört, welcher die Richtung des gebrochenen Strahles angiebt. Wenn umgekehrt ein Lichtstrahl unter dem Winkel von 48° 35′ aus dem Wasser hervorkommt, so macht er an der Oberfläche einen Winkel von 90° mit dem Einfallslothe *pp*, d. h. er bewegt

sich längs der Oberfläche des Wassers fort. Nun weiss man, dass es keinen Sinus giebt, der grösser als 1 ist. Uebersteigt daher für eine gewisse Grösse des Einfallswinkels der Sinus des Brechungswinkels die Einheit, so wird der Brechungswinkel selbst imaginär, was zu bedeuten scheint, dass für diesen Fall kein Uebergang des Lichtstrahles aus dem einen Mittel in das andere nach dem gewöhnlichen Brechungsgesetze stattfinden könne; vielmehr hat es den Anschein, als ob der Strahl an der Trennungsebene beider Mittel, wie an einer Spiegelfläche, zurückgeworfen werde. Macht also ein Lichtstrahl, während er sich im Wasser bewegt, einen Winkel mit dem Einfallslothe, der grösser als 48° 35′ ist, so wird er an der Oberfläche des Wassers gewissermassen vollständig reflectirt. Man kann diese Erscheinung auf verschiedene Weise wahrnehmen, so z. B. wenn man ein Trinkglas mit Wasser füllt, einen Schlüssel hineinstellt und von unten schief hinauf sieht. Diese sogenannte **totale Reflexion** findet also statt, sobald der Einfallswinkel eine solche Grösse erreicht, dass der Sinus des Brechungswinkels grösser als 1 wird; und sie kann auch da vorkommen, wo ein Lichtstrahl in einem sonst gleichartigen Medium aneinander grenzende Schichten von ungleicher Dichte zu durchdringen hat.

Fig. 21.



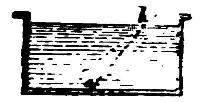
15. Aus der Richtungsänderung des Lichtes, wenn es aus einem durchsichtigen Medium in ein anderes übergeht, erklären sich viele bekannte Erscheinungen. So unter anderen, dass ein schief ins Wasser getauchter Stab, da wo er durch die Oberfläche des Wassers hindurchgeht, gebrochen erscheint. Eine hiermit verwandte Erscheinung, bei welcher dasselbe Object doppelt gesehen wird, lässt sich folgendermassen zur Darstellung bringen.*) Man steckt senkrecht auf ein dünnes Stäbchen eine Nadel und taucht dasselbe dann senkrecht so weit ins Wasser, dass beim behutsamen Emporziehen ein kleiner Wasserberg an der Nadel über der Oberfläche des Wassers haften bleibt. Sieht man nun an dem ins Wasser getauchten Stäbchen herunter, so erscheint

*) Gilbert's Annal. Bd. III. S. 235.

dasselbe von dem kleinen Wasserberge an auseinander getheilt, und der Grund dieser Erscheinung liegt darin, dass sich hier, an der Nadel zwei verschiedene Wasserflächen schneiden, gegen welche das Stäbchen nicht senkrecht steht, während in dem obigen Fall nur eine Wasserfläche vorhanden, gegen welche der schief eingetauchte Stab geneigt ist. Beide Flächen, die unter einem gewissen Winkel zusammenstossen, gewähren aber jede dieselbe Erscheinung wie dort die eine Wasserfläche, indem die von dem eingetauchten Stäbchen ausgehenden Lichtstrahlen durch dieselben in die Luft übergeben und hier in abgeänderter Richtung zu unserem Auge gelangen.

Eine andere hierher gehörige Erscheinung ist die, dass sich der Boden eines Gefässes zu heben scheint, wenn man in dasselbe allmälig mehr und mehr Wasser giesst. Ein Lichtstrahl *ab*, der von einem Punkte *a* des mit Wasser gefüllten Gefässes ausgeht, wird bei *b*, wo er in die Luft eintritt, gebrochen und nun etwa in der neuen Richtung *bo* in das Auge bei *o* dringen. Wäre der ganze Raum zwischen *a* und *o* mit Luft erfüllt, so würde das Auge den Punkt *a* in der Richtung *oa* wahrnehmen, in Folge der Ablenkung aber, welche der im Wasser fortgepflanzte Lichtstrahl *ab* bei seinem Uebergange in die Luft erfährt, erscheint nun der Punkt *a* in der verlängerten Richtung *ob*. Leicht überzeugt man sich hiervon in bekannter Weise, wenn man auf den Boden eines Gefässes ein Geldstück legt und sich dann so weit entfernt, bis man das letztere eben nicht mehr sieht, wo dann dasselbe, wenn man Wasser ins Gefäss giesst, allmälig wieder vollkommen sichtbar werden wird. — Ebenso ist es eine Folge der Lichtbrechung, dass in einem Glaswürfel ein zweiter kleinerer wahrgenommen wird; und dergleichen mehr.

Fig 22.



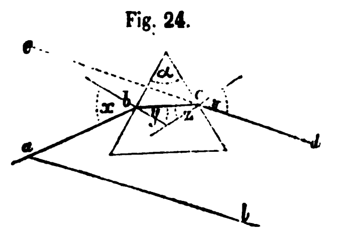
16. Nun erfährt aber ein Lichtstrahl, der aus einem Medium in irgend ein anderes übergegangen ist, eine abermalige Brechung, wenn er aus diesem zweiten Medium in das vorige von Neuem eindringt; und zwar erhält in dem Falle, dass ein durchsichtiger Körper von parallelen Ebenen begrenzt ist, der aus ihm in das vorige Mittel eintretende Strahl eine Richtung, die zu der Richtung des auffallenden Strahles parallel ist. Man denke sich unter *pq*

eine Glasplatte mit parallelen Oberflächen, auf welche ein Lichtstrahl *ab* unter dem Winkel x fällt. Da nun für den Uebergang des Lichtes aus Luft in Glas das Brechungsverhältniss $\frac{\sin x}{\sin y} = \frac{3}{2}$ ist, so lässt sich leicht der Brechungswinkel y und daher auch die Richtung des gebrochenen Strahles *bc* bestimmen. Errichtet man in c das Einfallsloth, so ist der Winkel z gleich dem Winkel y, und weil hier das Licht wieder in die Luft übergeht, also das Brechungsverhältniss $\frac{\sin z}{\sin v} = \frac{2}{3}$ das umgekehrte des obigen ist, hat man Winkel v gleich Winkel x, woraus folgt, dass der aus der Glasplatte in die Luft tretende Strahl *cd* parallel mit dem einfallenden *ab* ist. Und so kann man allgemein nachweisen, dass ein Lichtstrahl, welcher durch mehrere durchsichtige Körper mit parallelen Grenzflächen geht, zu seiner ursprünglichen Richtung parallel austritt.

Fig. 23.

Nach demselben Brechungsgesetze lässt sich aber auch die Richtung eines Lichtstrahles bestimmen, welcher auf ein Medium fällt, das von zwei gegen einander geneigten Ebenen begrenzt ist und in Rücksicht auf seine Form ein prismatisches genannt wird. — Nebenstehendes Dreieck bezeichne den Durchschnitt eines Glasprisma, auf welches im Punkte b ein Lichtstrahl *ab* falle. Errichtet man in b auf die Grenzebene eine Senkrechte, so ist diese das Einfallsloth und der Winkel x der Einfallswinkel, während der Brechungswinkel y sich aus $\frac{\sin x}{\sin y} = \frac{3}{2}$ bestimmt. Nun trifft der gebrochene Strahl bei c die gegenüberliegende Grenzebene des Prisma; errichtet man auch hier ein Einfallsloth, so hat man den Einfallswinkel z für den Uebergang des Lichtes aus Glas in Luft, und den Brechungswinkel v, der die Richtung des austretenden Strahles *cd* giebt, aus $\frac{\sin z}{\sin v} = \frac{2}{3}$.

Fig. 24.



Die Ablenkung aber, welche der einfallende Strahl durch das Prisma erfährt, ist durch den Winkel gegeben, welchen jener Strahl



mit dem austretenden *cd* macht; daher ist, wenn man die Linie *al* parallel zu *cd* zieht, der Winkel *bal* diese Ablenkung.

Man erkennt nun leicht, dass Gegenstände durch ein Prisma betrachtet bedeutend von ihrem wirklichen Orte verrückt erscheinen können. Befindet sich das Auge in *d*, so wird es den Punkt *a* in der verlängerten Richtung *dc*, etwa in *e* erblicken. In diesem Falle, wo der brechende Winkel α des Prisma nach oben gekehrt ist, erscheint also der Gegenstand gehoben; dagegen wird derselbe erniedrigt gesehen, wenn der brechende Winkel nach unten gekehrt ist.

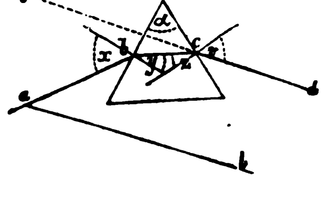
Die Ablenkung des Lichtes durch ein Prisma hängt sowohl von dem brechenden Winkel als auch von der brechenden Substanz desselben ab, und ist überdies durch die Richtung bestimmt, in welcher die Lichtstrahlen das Prisma treffen. Die Ablenkung eines Strahles ist aber unter sonst gleichen Umständen am kleinsten, wenn derselbe so gebrochen wird, dass er bei seinem Ein- und Austritt gleiche Winkel mit den Seiten des Prisma macht, so dass denn auch die Winkel y und x, die der gebrochene Strahl mit den in *b* und *c* errichteten Einfallslothen bildet, einander gleich sind.

Sieht man durch ein Prisma nach einem Punkt und dreht dabei das erstere langsam um seine Axe, so findet sich immer eine Stellung des Prisma, in welcher der betrachtete Punkt am geringsten aus seinem wirklichen Orte verschoben erscheint. Man mache auf ein weisses Papier einen schwarzen Punkt und halte das Prisma so, dass man den Punkt durch dasselbe sieht, und zwar wegen der Brechung des Lichtes verrückt von seiner wahren Stelle nahe an der Kante des Prisma, während man zugleich über dem letzteren den Punkt auf dem Papier selbst wahrnimmt. Dreht man jetzt das Prisma langsam um seine Axe, so dass der brechende Winkel von unten nach oben rückt, so treten die beiden Punkte einander immer näher, indem der durch das Prisma gesehene sich bewegt; endlich scheint der letztere stille zu stehen, aber bald bewegt er sich wieder und entfernt sich dann immer mehr von dem Punkte auf dem Papier.

17. Man hat nach den obigen Betrachtungen $\frac{\sin x}{\sin y} = n$, wo n den Brechungsexponenten für den Uebergang des Lichtes aus Luft in die durchsichtige Substanz des Prisma bedeutet. Be-

rücksichtigt man nun den Fall der kleinsten Ablenkung, wo also der einfallende und austretende Strahl mit den Seiten des Prisma gleiche Winkel bilden, so findet sich leicht, dass Winkel $x = \frac{\alpha + \delta}{2}$ und Winkel $y = \frac{\alpha}{2}$ ist, wenn α den brechenden Winkel des Prisma und δ den Ablenkungswinkel *bal* bezeichnet.

Fig. 25.



Daher ist denn auch $n = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$.

Diese Formel lässt sich zur Bestimmung des Brechungsexponenten irgend einer durchsichtigen Substanz, aus der man ein Prisma verfertigen kann, benutzen. Misst man nämlich den brechenden Winkel α dieses Prisma und die kleinste Ablenkung δ eines durch dasselbe gehenden Strahles, so hat man alle Data zur Berechnung von n. Man kann nun, um den Winkel δ zu ermitteln, das Prisma auf eine drehbare Platte stellen, welche vor dem Objectivglase eines mit einem Höhenkreise versehenen Fernrohres angebracht ist. Sieht man durch das Fernrohr das gebrochene Bild eines entfernten Punktes, der sein Licht durch das Prisma sendet, so kann man es durch Drehung des letzteren leicht dahin bringen, dass der einfallende Lichtstrahl seinen Weg in einem auf die Seitenflächen des Prisma senkrechten Querschnitt nimmt, in welchem Falle dann der Strahl die geringste Ablenkung von seiner ursprünglichen Richtung erfährt. Nimmt man hierauf das Prisma hinweg und richtet das Fernrohr auf den entfernten Punkt, so findet sich am getheilten Kreise der Winkel, welchen die jetzige Lage des Rohres mit der vorigen macht. So liess Fraunhofer von einer entfernten Lampe durch eine kleine Oeffnung i einen Lichtstrahl ip' auf ein Prisma fallen. Das letztere stand dicht vor einem Fernrohr ob, welches so gedreht wurde, dass der gebrochene Strahl hindurchging und bei o ins Auge gelangte. Da nun am Drehpunkte C ein in Grade eingetheilter Kreis angebracht war, konnte man den Winkel

Fig. 26.

ablesen, den der aus dem Prisma tretende Strahl po mit dem directen oi machte.

In gleicher Weise lässt sich auch der Brechungsexponent für Flüssigkeiten bestimmen, wenn man sie in ein Hohlprisma einschliesst, das aus Glasplatten mit sehr parallelen Oberflächen zusammengefügt ist. Oder man durchbohrt ein solides Glasprisma so, dass ein von einer Seitenfläche nach der andern hinüber gehendes Loch entsteht. Dieses Loch füllt man mit der Flüssigkeit, deren Brechungsexponent zu bestimmen ist, und legt dann an das Prisma beiderseits Platten von geschliffenem Spiegelglase, um das Loch zu schliessen. Uebrigens verfährt man wie oben.

Um nach derselben Methode die Brechungsverhältnisse des Lichtes für verschiedene Gase zu bestimmen, gebrauchten Biot*) und Arago ein Prisma, das, wie die Figur im Durchschnitte zeigt, aus einer cylindrischen Glasröhre bestand, deren Enden schräg abgeschliffen waren, so dass sie einen Winkel von 145° 7′ 28″ mit einander bildeten. Diese Enden waren durch Glasplatten mit möglichst parallelen Oberflächen luftdicht verschlossen. Senkrecht auf ihrer Länge hatte aber die Röhre eine Oeffnung, worin ein Röhrchen eingekittet war, das durch einen Hahn geöffnet und geschlossen werden konnte, um mittelst einer Luftpumpe das Prisma luftleer zu machen oder mit irgend einem Gase zu füllen.

Fig. 27.

Beiläufig noch die Bemerkung, dass man das Brechungsverhältniss für den Uebergang des Lichtes aus dem leeren Raume in irgend ein Mittel den absoluten Brechungsquotienten (oder absoluten Brechungsexponenten) dieses Mittels nennt, während der relative Brechungsquotient für den Uebergang des Lichtes aus einem Mittel in ein anderes gleich dem Quotienten aus dem absoluten Brechungsquotienten des ersten Mittels in den des zweiten ist. Daher ist, wenn man den absoluten Brechungsquotienten des ersten Mittels m durch e' und den des zweiten m' durch e'' bezeichnet, $\frac{e''}{e'}$ der relative Brechungsquotient für den Uebergang des Lichtes aus m in m'.

*) Gilbert's Annal. Bd. 25. S. 345, 365, Bd. 26. S. 36.

18. Die bisher beschriebene Methode, die Brechungsexponenten zu bestimmen, ist sehr wohl anwendbar bei tropfbar flüssigen und gasförmigen, sowie auch bei starren Körpern, die sich leicht in die Form eines Prisma bringen lassen. Begreiflicherweise ist aber bei vielen starren Körpern die Herstellung eines Prisma entweder sehr schwierig oder geradezu unthunlich. Indessen hat man noch andere Methoden, nach welchen sich die Brechungsverhältnisse verschiedener Substanzen bestimmen lassen. Wir erwähnen hier noch einer, deren sich Brewster zur Ermittelung der Brechungsexponenten starrer Körper bediente. Man legt nämlich den betreffenden Körper in eine Flüssigkeit, die man durch Mischung verschiedener Flüssigkeiten von bekanntem Brechungsvermögen so herstellt, dass sie dasselbe Brechungsvermögen wie der eingetauchte starre Körper erhält, dessen Brechungsverhältniss sich dann natürlich aus dem der Flüssigkeit ergiebt. Sobald nämlich der starre Körper mit der Flüssigkeit, worin er sich befindet, ein gleiches Brechungsvermögen besitzt, erscheint derselbe sofort durchsichtig, wenn er auch vorher wegen Unebenheiten seiner Oberfläche undurchsichtig erschien. Brewster brachte z. B. ein unregelmässiges Stück Crownglas, das seiner rauhen Oberfläche wegen völlig undurchsichtig war, in canadischen Balsam, worin es so durchsichtig wurde, dass man durch dasselbe lesen konnte. Hiernach wird also ein Gemenge verschiedener durchsichtiger Substanzen vom Lichte um so vollständiger durchstrahlt, je geringer der Unterschied im Brechungsvermögen derselben ist.

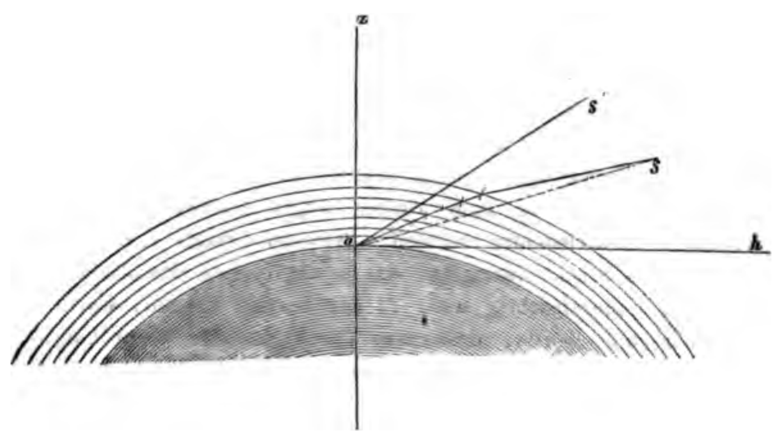
Was nun die Gase insbesondere betrifft, so fanden Biot und Arago aus ihren Versuchen, dass dieselben das Licht um so stärker brechen, je dichter sie sind. Dies gilt nach Dulong's Versuchen*) auch für Dämpfe, so dass ihre sogenannte brechende Kraft, wie bei den Gasen, der Dichte proportional ist, vorausgesetzt, dass dieselben noch hinreichend weit von ihrem Condensationspunkte entfernt sind. Auch ist die brechende Kraft einer Mischung von Gasen gleich der Summe der Brechungen in den Bestandtheilen; doch findet eine solche Beziehung bei einem chemisch zusammengesetzten Gase nicht statt. Um aber die Brechungsverhältnisse verschiedener Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur mit einander zu vergleichen, gab Dulong den

*) Poggend. Ann. Bd. VI. S. 373.

einzelnen Gasen in jenem Hohlprisma eine solche Dichte, dass sie alle genau dieselbe Ablenkung der Lichtstrahlen bewirkten.

19. Da nun die Gase das Licht um so stärker brechen, je dichter sie sind, so muss jeder Lichtstrahl, der von einem Weltkörper schief auf unsere Atmosphäre fällt, beständig abgelenkt werden, indem er in immer dichtere Luftschichten kommt, und daher eine krumme Linie beschreiben. Man denke sich die Atmosphäre, welche unsere Erde umgiebt, in concentrische Schichten zerlegt, deren Dichte nach der Erdoberfläche hin beständig zunimmt. Dringt nun ein Lichtstrahl von einem Gestirne *s* schief

Fig. 28.



in die Atmosphäre ein, so wird derselbe bei jedem Uebergange in die nächstfolgende Schicht eine Brechung nach dem Einfallsloth zu, das senkrecht auf der Schicht steht, erfahren. Darum muss der Strahl innerhalb der Atmosphäre eine nach oben convexe Bahn beschreiben.

Das Auge eines Beobachters in *o* wird aber den Ort des Gestirnes nach derjenigen Richtung bestimmen, in welcher der Strahl schliesslich in dasselbe eindringt, d. h. nach der Richtung der Tangente *os'* jener Bahn, die der Strahl innerhalb der Atmosphäre beschreibt. So sieht also der Beobachter das Gestirn nicht an seinem wahren Orte *s*, sondern h ö h e r in *s'*, und zwar unter dem Winkel *hos'* über dem Horizonte *oh*, während dasselbe unter dem Winkel *hos* erscheinen würde, wenn keine Brechung und Ablenkung des Lichtes durch unsere Atmosphäre stattfände. Diese Ablenkung ist aber um so grösser, je länger der Weg ist, den das

Licht in der Atmosphäre zurücklegen muss, um in das Auge des Beobachters zu dringen, und daher am grössten, wenn das Gestirn im Horizonte steht. Dagegen wird sie immer kleiner, je mehr sich das Gestirn unserem Zenith z nähert, so dass sie ganz verschwindet, wenn es in dem letzteren steht, weil nun die vom Gestirne ausgehenden Strahlen die Atmosphäre senkrecht durchdringen und demzufolge keine Brechung erfahren.

Es ist eine Folge der atmosphärischen Strahlenbrechung, dass man Sonne und Mond schon sieht, ehe sie noch aufgegangen sind, und ebenso noch wahrnimmt, wenn sie bereits untergegangen sind, d. h. schon unter dem Horizont stehen. So geht also die Sonne scheinbar früher auf und später unter, als es wirklich der Fall ist, was eine Verlängerung der Tageszeit bewirkt. Und von derselben Strahlenbrechung rührt es auch her, dass uns Sonne und Mond bei ihrem Auf- und Untergange in einer abgeplatteten Gestalt, nämlich im vertikalen Durchmesser kleiner als im horizontalen erscheinen. Denn die vom unteren Rande herkommenden Strahlen erleiden in unserer Atmosphäre eine stärkere Brechung als die vom oberen Rande ausgehenden, so dass jener Rand mehr als dieser gehoben wird, und daher beide Ränder, der obere und untere, einander näher erscheinen müssen.

Man unterscheidet die astronomische Strahlenbrechung von der irdischen, je nachdem die Lichtstrahlen von Himmelskörpern oder von irdischen Objecten kommen. Im ersten Falle durchdringen die Lichtstrahlen die ganze Atmosphäre, im zweiten nicht. Aber man erkennt sofort, dass auch die Lichtstrahlen, welche von einem hochgelegenen Punkte eines entfernten irdischen Objekts ausgehen, indem sie in die tieferen Schichten der Atmosphäre eindringen, hier eine nach oben convexe Bahn beschreiben müssen, deren Tangente im Auge des Beobachters dann wieder die Richtung angiebt, nach welcher jener Punkt wahrgenommen wird. *)

20. Durch eine Brechung und Reflexion der Lichtstrahlen in der Atmosphäre entstehen nun auch die unter dem Namen „Luftspiegelungen“ bekannten Erscheinungen, welche im Allgemeinen darin bestehen, dass man von entfernten Gegenständen, die

*) Ueber astronomische Strahlenbrechung s. Lottner in Zeitschr. f. Mathematik und Physik von Schlömilch und Witschel, Bd. II. S. 319.

im Originale dem Beobachter nicht immer sichtbar sind, einfache oder doppelte, und zwar entweder aufrechte oder verkehrte, oder verschobene Bilder wahrnimmt. Man sieht sie auf ausgedehnten Ebenen, an Gegenküsten und auf dem Meere, wo sie von den Seeleuten hie und da: Kimmung, Erhebung oder Seegesicht genannt werden. Manche dieser Bilder, und zwar häufig die verkehrten, erscheinen unterhalb der wirklichen Objecte, wie die Spiegelbilder einer Wasserfläche. Auf der See sah man jedoch öfter das verkehrte Bild eines Schiffes über dem letzteren, nicht selten aber auch, wenn ein Schiff noch nicht ganz im Horizonte des Beobachters war, zwei Bilder, nämlich ein aufrechtes und verkehrtes Luftbild, über dem Schiffe.*) — Auch sind jene Erscheinungen, die man an der Meerenge von Messina beobachtet und Fata morgana (Schlösser der Fee Morgana) genannt hat, hierher zu rechnen.

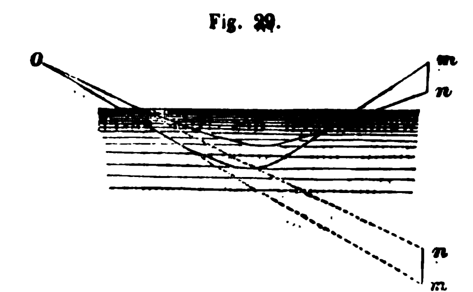
Folge einer ungewöhnlichen irdischen Strahlenbrechung in der Luft war eine Erscheinung, die am 25. Juli 1798 gegen 5 Uhr Nachmittags in England zu Hastings gesehen wurde. Von diesem Orte, an der Küste von Sussex, sind die Klippen an der französischen Küste funfzig englische Meilen entfernt, und werden von der Krümmung der Erde verborgen. Zur angegebenen Zeit konnte man aber die französische Küste mit blossen Augen sehen. Latham**), der die Erscheinung von einer Klippe aus genauer beobachtete, sah zu gleicher Zeit Dungeness, Dover Cliffs und die ganze Länge der französischen Küste von Calais, Boulogne u. s. w. bis St. Vallery. Mit Hülfe eines Fernrohrs sah man deutlich die französischen Fischerboote vor Anker liegen, und unterschied auch die verschiedenen Farben des Landes auf den Höhen, so wie die Gebäude.

21. Die Ursache vieler Luftspiegelungen liegt nun in der Ablenkung gewisser Strahlensysteme, welche von den Gegenständen aus ungleich erwärmte Luftschichten von verschiedener Dichte durchdringen. Durch die horizontalen Linien in nachstehender Figur seien Luftschichten von ungleicher Dichte angedeutet, so dass die letztere von unten nach oben allmälig zunimmt. Dieser Fall kann, gegen die Regel, wirklich vorkommen, wenn der Boden

*) Vgl. Vince in Philos. Transact. for 1799. p. 13. — Gilbert's Annalen Bd. IV. S. 109.

**) Philos. Transact. for 1798. p. 357. — Gilb. Annal. Bd. IV, S. 142.

Fig. 29.



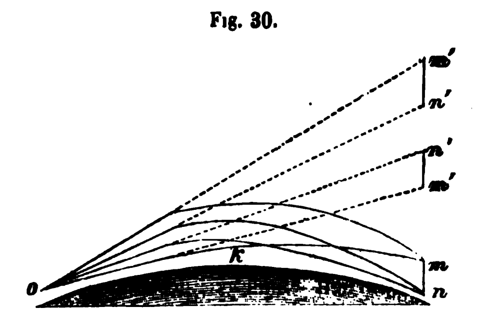
bei ruhiger Luft von der Sonne stark erwärmt wird. Das Auge in *o* sieht dann einmal ein directes Bild des erhabenen Gegenstandes *mn*, welches bewirkt ist durch Lichtstrahlen, die nahezu in gerader Richtung von den Punkten des Gegenstandes nach dem Auge gelangen, und ausserdem noch ein verkehrtes Bild des Gegenstandes unterhalb des letzteren, da von jedem Punkte des Gegenstandes auch solche Strahlen ausgehen, welche in die dünneren Luftschichten eindringen und hier beständig von dem Einfallslothe hinweggebrochen werden. Diese Strahlen gelangen aber bald zu einer Grenze, von wo aus sie in noch dünnere Luftschichten nicht mehr übergehen können; hier erfahren sie eine Reflexion (S. 29.) und beschreiben dann auf der anderen Seite eine der vorigen entsprechende Bahn. Da nun das Auge die Bilder der verschiedenen Punkte des Gegenstandes in denjenigen Richtungen sieht, in welchen die betreffenden Strahlen dasselbe schliesslich treffen, so folgt, dass das Auge ein verkehrtes Bild *nm* des Gegenstandes *mn* in der bezeichneten Richtung wahrnehmen muss. — Auch diejenigen Lichtstrahlen, welche von dem hinter den Objecten liegenden Himmel ausgehen, werden in jenen Luftschichten die beschriebene Ablenkung erfahren und das Bild des Wassers hervorbringen, worin die verkehrten Bilder der Objecte sich zu spiegeln scheinen. — Derartige Erscheinungen lassen sich nun auch künstlich darstellen, wenn man nach Wollaston einen etwas länglichen Kasten von Eisenblech mit glühenden Kohlen füllt. Dann werden die Strahlen, welche von einem entfernten erhabenen Object in die erhitzten Luftschichten über den Kohlen dringen, auf die angegebene Weise abgelenkt werden und im Auge ein verkehrtes Bild des Objects erzeugen.

Diese Erklärung gilt nach Monge für die Bilder, welche in den Ebenen Egyptens zur Zeit der französischen Expedition (17

wahrgenommen wurden. Der Boden von Nieder-Egypten ist eine sehr grosse, wagerechte Ebene, auf welcher sich nur einige mit Dörfern besetzte Anhöhen befinden, welche durch diese Lage gegen die Ueberschwemmungen des Nils geschützt sind. Abends und Morgens erscheint die Landschaft, so wie es die wirkliche Lage, Grösse und Entfernung der Gegenstände mit sich bringt. Am Tage aber, wo der Boden von der Sonne erhitzt wird, scheint das Land in einer gewissen Entfernung durch eine allgemeine Ueberschwemmung begrenzt zu werden. Die über diese Grenze hinausliegenden Dörfer erscheinen wie Inseln in einem grossen See. Ueber jedem Dorfe sieht man dessen umgekehrtes Bild, ganz so wie es erscheinen würde, wenn es wirklich am Wasser läge. Nähert man sich, so rücken die Grenzen dieser scheinbaren Ueberschwemmung weiter hinaus; der das Dorf umgebende eingebildete See zieht sich zurück, verschwindet endlich ganz und die Täuschung erneuert sich für ein anderes entfernteres Dorf.

22. Dagegen kann es aber auch geschehen, dass die Luft von einer gewissen Höhe gegen die Erdoberfläche hin in einem grösseren als dem gewöhnlichen Masse an Dichte zunimmt. Ist z. B. die Oberfläche der See bei sonst hellem Wetter viel kälter als die atmosphärische Luft, so wird die zunächst der See befindliche Luft allmälig kälter werden, indem sie ihre Wärme zum Theil an das Wasser abgiebt, und die unmittelbar darüberliegende Luftschicht wird ihre Wärme der kühleren, zunächst unter ihr liegenden mittheilen, so dass die Luft von der Oberfläche der See an aufwärts mehr als gewöhnlich an Dichte abnehmen muss. Andere Umstände, die sich leicht denken lassen, können ähnliche Dichtigkeitsverhältnisse der Luft mit sich bringen, in der Art, dass tiefere dichtere Luftschichten unmittelbar von höheren, verhältnissmässig viel dünneren überlagert werden. Dann müssen die Lichtstrahlen, welche von einem im oder noch unter dem Horizont des Auges befindlichen Gegenstande ausgehen, bei ihrem Uebergange aus den unteren dichteren in die dünneren Luftschichten beständig vom Einfallslothe hinweggebrochen werden und also eine nach oben convexe Bahn beschreiben. Bei einer gewissen Grösse des Einfallswinkels können sie aber nicht weiter in noch dünnere Luftschichten eindringen, sondern sie werden reflectirt und beschreiben dann in Folge neuer Brechung nach dem Einfallslothe zu eine der vorigen ähnliche, jedoch nach unten ge-

Fig. 30.



richtete Bahn. Wenn nun hierbei die Strahlen, welche von den oberen und unteren Punkten eines Gegenstandes *mn*, z. B. eines Schiffes ausgehen, — das dem Auge bei *o* durch die Krümmung der Erdoberfläche verdeckt ist, — sich vor dem Auge bei *k* kreuzen, so wird man ein verkehrtes Bild *n'm'* wahrnehmen. Wäre aber das Auge dem Schiffe etwas näher als der Durchkreuzungspunkt *k* der Strahlen, so würde ein aufrechtes Bild des Schiffes, etwas über das wirkliche Schiff erhaben, gesehen werden. Da indess jeder Punkt des Gegenstandes Lichtstrahlen nach allen Richtungen aussendet, kann es hier auch solche Strahlensysteme geben, welche höhere Schichten der Atmosphäre treffend auf die angegebene Weise in das Auge bei *o* gelangen, ohne dass sie sich vor dem letzteren kreuzen. Dieselben geben dann ein höher liegendes aufrechtes Bild *m'n'* des Schiffes; und so können bei der vorausgesetzten Beschaffenheit der Luft, falls das Auge sich in der gehörigen Entfernung befindet, zwei Bilder zugleich, ein verkehrtes und ein aufrechtes, gesehen werden.

Auch dieser Fall lässt sich nach Wollaston*) durch Versuche zur Darstellung bringen. In eine Glaswanne giesst man klaren Syrup oder statt dessen Schwefelsäure bis zu einer gewissen Höhe und füllt den noch übrigen Raum mit Wasser aus. Von einem Gegenstande, der auf der einen Seite des Glasgefässes zweckmässig aufgestellt ist, gewahrt man dann ein verkehrtes und ein aufrechtes Bild, wenn das Auge etwa über die Grenzfläche der beiden ungleich dichten Flüssigkeiten hinwegsieht. Der Syrup oder die Schwefelsäure verbindet sich nämlich nach und nach mit dem Wasser und bildet so eine stufenweise sich verändernde Dichte,

*) Philos. Transact. for 1800, p. 239.

die von der des Syrups oder der Schwefelsäure bis zu der des reinen Wassers abnimmt. Dieselben Erscheinungen werden hervorgebracht, wenn man in das Glasgefäss Wasser und darüber Alkohol giesst.

Seltner, wie es scheint, kommt ein Fall vor, der von Jurine und Soret am 17. September 1818 beobachtet wurde. Hier befand sich nämlich das Bild auf der einen Seite des wirklichen Objects, während die oben beschriebenen Bilder unter oder häufig auch über den wirklichen Objecten gesehen wurden. Gegen 10 Uhr Morgens sahen die Genannten auf dem Genfer See eine Barke von dem linken Ufer des Sees sich Genf nähern; zu gleicher Zeit bemerkte man ein Bild der Segel über dem Wasser, welches, statt der Richtung der Barke zu folgen, sich von dieser trennte, und sich vom rechten Ufer her Genf zu nähern schien. Als sich das Bild zuerst von der Barke trennte, hatten beide eine gleiche Grösse, das Bild wurde jedoch kleiner, so wie es sich davon entfernte, und hatte bis auf die Hälfte abgenommen, als es verschwand. Dieses Bild entstand nun wahrscheinlich durch dieselbe Ursache wie jene Luftbilder eines Schiffes, nur mit dem Unterschiede, dass hier die ungleich dichten Luftschichten senkrecht auf dem Wasser standen, während sie dort, wie bei den früher angeführten Erscheinungen, horizontal und parallel mit der Wasseroberfläche waren. Nimmt man dieselben Dichtigkeitsverhältnisse der Luft, die (Fig. 30.) in einer vertikalen Richtung stattfinden, als in einer horizontalen Richtung vorhanden an, so werden dieselben Bilder in horizontalem Sinne entstehen. In dem Falle mit der Genfer Barke wurde das Bild $m'n'$ sichtbar. Der Zustand der Luft aber, welcher hier das seitwärts liegende Bild erzeugte, kam wahrscheinlich daher, dass Morgens die Luft über dem östlichen Ufer des Sees noch im Schatten lag, während dieselbe weiter gegen Westen hin schon von der Sonne erwärmt war.

23. Verschiedene andere optische Erscheinungen, die man wohl noch unter den Luftspiegelungen anzuführen pflegt, haben andere Ursachen als die bisher beschriebenen; so z. B. das sog. Brockengespenst. Von den Besteigern des Brockens sind nämlich oft in grösserer oder geringerer Entfernung Gestalten wahrgenommen worden, welche die Bilder ihrer eigenen Personen oder auch anderer im Originale nicht sichtbarer Besteiger des Berges waren. Dieselben sind nichts anderes als die meist kolossalen Schatten-

bilder der Beobachter und anderer Gegenstände, welche sich auf Dünsten darstellen. Sie werden, wie es die Bildung des Schattens mit sich bringt, meist gesehen, wenn die Sonne im Horizont steht, also namentlich beim Auf- und Untergange der Sonne. Silberschlag*) sah einmal im Herbst während des Sonnenunterganges den Schattenriss des Brockens selbst in enormer Grösse nach Osten hin, in der Gegend von Halberstadt, im Nebel schweben. Und Bouguer**) sah auf dem Pichincha in Peru in dem Augenblicke, als die Sonne aufging, auf einer weissen, etwa dreissig Schritte von ihm entfernten Wolke, seinen eigenen Schatten, und zwar den Kopf mit drei oder vier kleinen, unter sich gleichlaufenden regenbogenartigen Kreisen umgeben, welche sehr lebhaft glänzten. Diese Kreise entstehen auf dieselbe Weise***) wie die kleinen Höfe um Sonne und Mond, nämlich durch eine sogenannte Beugung der Lichtstrahlen bei ihrem Vorübergange an den Dunstbläschen der Atmosphäre. Mitunter sieht man wohl auch, bei niedrigem Stande der Sonne, den Schatten seines eigenen Kopfes von einem hellen Schein umgeben, der über dem obern Theil des Schattens am meisten ausgedehnt erscheint, und besonders dann auffallend hervortritt, wann der Schatten auf eine mit Gras o. dgl. bewachsene und bethaute Fläche fällt. Während nämlich die weiter seitwärts gelegenen Grashalme uns mehr oder minder ihre dunkle Seite zukehren, sieht man von den nahe um den Schatten des Kopfes liegenden Halmen die erleuchtete Seite und von den auf ihnen befindlichen Thautropfen den Spiegelglanz sowohl von ihrer Oberfläche als auch von ihrer Rückseite. Insofern nun die oberhalb des Schattens gelegenen Halme uns alle die beleuchtete Seite zukehren, wird man auch den Schein vorzugsweise nach dieser Richtung hin um den Schatten des eigenen Kopfes ausgebreitet sehen.

24. In ähnlicher Weise wie in einem prismatisch gestalteten Mittel geschieht auch die Brechung des Lichtes in sogenannten

---

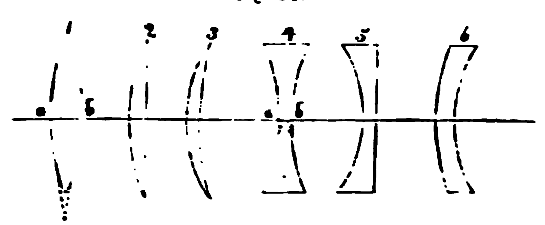
*) Geogenie. Th. I. S. 136.

**) Mém. de l'Acad. Roy. 1744. p. 264. Vgl. auch Scoresby's Reise auf den Wallfischfang. S. 285 ff Journal of a Voyage to the northern Whalefishery. p. 276. — Bezüglich der Erklärung eines weissen Regenbogens auf niedrigen Nebeln s. Bravais in Annal. de Chim. et Phys. Ser. III. T. XXI. p. 348; — Poggend. Ann. Ergänzungsbd. II. S. 562.

***) Vgl. Fraunhofer: Theorie der Höfe und Nebensonnen in Schuhmacher's astronom. Abhandl. Bd. III. S. 56.

Linsen, worunter man im Allgemeinen solche Medien versteht, deren Oberflächen durch Kugelabschnitte gebildet sind. Die nachstehende Abbildung (1—6 zeigt sechs verschiedene Linsen im

Fig. 31.



Durchschnitte. So ist Fig. 1 eine doppeltconvexe (biconvexe) Linse, welche von zwei convexen Kugelsegmenten begrenzt ist Verbindet man die Mittelpunkte der beiden Kugelflächen, zu welchen diese Abschnitte gehören, durch eine gerade Linie, so ist dieselbe die Axe der Linse. Uebrigens können die beiden Halbmesser, welche die Axe ausmachen, an Länge gleich oder ungleich sein. Fig. 2. ist eine planconvexe Linse, die man sich dadurch entstanden denken kann, dass von einer Kugel ein Stück mittelst einer durchgelegten Ebene abgeschnitten ist. Eine solche Linse ist also auf der einen Seite von dem Stücke einer Kugelfläche, auf der anderen von einer Ebene begrenzt. Die Axe ist hier die durch den Mittelpunkt der Kugelfläche gehende und auf der Ebene der Linse senkrecht stehende gerade Linie. Die Fig. 3. zeigt eine concav-convexe Linse, insofern die eine Seite von einer concaven, die andere von einer convexen Fläche begränzt ist. Bei ihr ist die convexe Fläche mit einem kleineren Halbmesser beschrieben als die concave, d. h. jene Fläche hat eine stärkere Krümmung als diese. Umgekehrt verhält es sich bei der Linse 6, deren concave Fläche stärker gekrümmt ist als ihre convexe Seite. Man nennt sie eine convex-concave Linse. Das Profil der Linse 3 hat Aehnlichkeit mit der Mondsichel, weshalb diese Linse wohl auch Lunula oder (griech.) Meniscus genannt wird. Die Linse 4 ist auf beiden Seiten von concaven Flächen gebildet und heisst darum biconcave Linse. Endlich zeigt Fig. 5. den Durchschnitt einer planconcaven Linse. — Geht die Axe einer Linse durch den Mittelpunkt ihrer Gestalt, so heisst die Linse centrirt.

Denken wir uns an die Punkte *a* und *b*, in welchen die

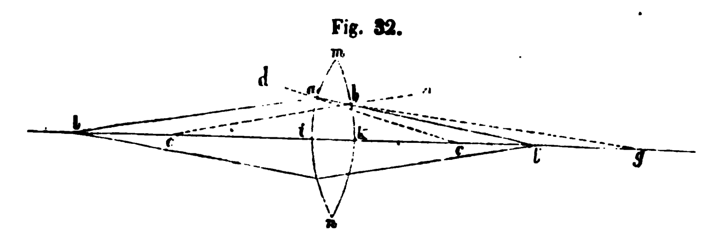
Axe die Oberfläche der Linse trifft, Ebenen gelegt, so sind diese zu einander parallel. Dies gilt für alle Linsen, die wir angeführt haben; nur fällt bei den planconvexen und planconcaven Linsen die eine dieser parallelen Ebenen mit der ebenen Fläche der Linse selbst zusammen. Dagegen schneiden sich die Berührungsebenen, welche an anderen Punkten einer Linse angelegt werden. Vergleicht man aber in dieser Beziehung die convexen mit den concaven Linsen (Nr. 1 u. 4), so ergiebt sich, dass bei jenen der Durchschnittspunkt der letzterwähnten Ebenen, von der Axe aus gesehen, nach dem Rande hin liegt, während es sich bei den concaven umgekehrt verhält. Man kann hiernach eine convexe Linse als eine Combination unzähliger schmaler Prismen betrachten, deren brechender Winkel von der Axe abgewendet ist, dagegen eine concave Linse als eine Combination solcher Prismen, deren brechende Winkel in der Richtung von dem Rande nach der Axe hin liegen. Und hiermit hängt es zusammen, dass die von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Lichtstrahlen bei ihrem Durchgange durch eine Convexlinse convergenter gemacht und meist in einem kleineren Raume gesammelt werden, während concave Linsen solche Strahlen divergenter machen (s. weiterhin). Daher nennt man die Convexlinsen auch Sammel- oder Collectivlinsen, die Concavlinsen hingegen Zerstreuungslinsen.

In der Regel bestehen die Linsen aus einem dichteren Mittel als die umgebende atmosphärische Luft, so dass die Lichtstrahlen aus einem dünneren Medium (Luft) auf ein dichteres mit convexer oder concaver Oberfläche treffen, und aus diesem wieder in das dünnere austreten. Gewöhnlich verfertigt man die Linsen aus weissem Spiegelglase, in manchen Fällen auch aus durchsichtigen Edelsteinen, oder man bildet sie aus Glasschalen von entsprechender Gestalt, die mit irgend einer durchsichtigen Flüssigkeit gefüllt werden.

Ausser den sphärischen Linsen giebt es auch solche mit elliptischen oder parabolischen Flächen, etc.; doch handelt es sich meist um sphärische Linsen, die wir so eben charakterisirt haben.

25. Die umstehende Figur stelle nun den Durchschnitt einer biconvexen Glaslinse vor. c sei der Mittelpunkt der Fläche min und c' derjenige der Fläche mkn. Dann ist die durch c und c' gehende Gerade die Axe der Linse; und wenn diese Axe zu-

Fig. 32.



gleich durch die Mitte der Gestalt der Linse geht, heisst die letztere centrirt. Soll nun die Bedingung erfüllt werden, dass die von einem Punkte ausgehenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse sich wieder in einem Punkte vereinigen, so müssen diese Strahlen unter einem sehr kleinen Winkel mit der Axe auf die Linse fallen. Die letztere muss eine verhältnissmässig geringe Dicke haben, und ihre beiderseitigen Begrenzungsflächen müssen kleine Stücke von möglichst grossen Kugeln darstellen. Dann lassen sich die zwischen den Einfallspunkten der Lichtstrahlen und der Axe liegenden Bogenstücke als gerade Linien ansehen, die auf der Axe senkrecht stehen. Es treffe also der Lichtstrahl *la*, der von einem leuchtenden Punkte *l* in der Axe ausgeht, die Linse unter einem verhältnissmässig sehr kleinen Winkel mit der Axe *cc'*. Zu diesem Strahle gehört als Einfallsloth der von dem Krümmungsmittelpunkte *c* der Fläche *min* gezogene Halbmesser *ca*, der auf dieser Fläche senkrecht steht. Nun wird die Divergenz des Strahles *la* bei seinem Eintritt in die Linse, vermöge der Brechung nach dem Einfallslothe *cad* zu, etwas vermindert, so dass er etwa die Richtung *ab* annimmt, die sich, wenn der Einfallswinkel *lad* und das Brechungsverhältniss bekannt sind, aus dem Brechungswinkel *cab* ergiebt. Der gebrochene Strahl *ab* fällt aber bei *b* auf die andere Fläche der Linse und erfährt hier, weil er wieder in die Luft übergeht, eine zweite Brechung (vom Einfallslothe *c'b* hinweg), die ihm etwa die Richtung *bl'* ertheilen wird. Das Einfallsloth in Bezug auf den Punkt *b* ist nämlich der Halbmesser *c'b* der Fläche *mkn*. Da wir nun voraussetzten, dass der Strahl *la* einen sehr kleinen Winkel mit der Axe der Linse macht, so ist der Bogen *ai* nur von einer sehr geringen Grösse; daher wir $la = li$ und auch, insofern die Dicke der Linse nur unbedeutend ist, $ag = ig = kg$ setzen können. Sei nun der Abkürzung wegen die Entfernung *li* des leuchtenden Punktes von der Linse $= e$, der Abstand *l'k* des Durchschnittspunktes *l'* des aus der Linse treten-

den Strahles mit der Axe $= e'$, $kg = bg = ag = s$, der Halbmesser $ca = ck = ci = r$ und der Halbmesser $c'b = c'i = r'$, endlich das Brechungsverhältniss für den Uebergang des Lichtes aus Luft in die Substanz der Linse $= n$.

Es ist dann $\sin lad : \sin cag = n : 1$ oder $\frac{\sin lad}{\sin cag} = n$, und in den Dreiecken lac und cag ist $la : lc = \sin lca : \sin lac$ oder $\frac{la}{lc} = \frac{\sin lca}{\sin lac}$.

Ferner ist $cg : ag = \sin cag : \sin acg$ oder $\frac{cg}{ag} = \frac{\sin cag}{\sin acg}$. Nun sind die Winkel lad und lac als Nebenwinkel $= 180°$, ebenso auch die Winkel lca und acg; daher ist $\sin lad = \sin lac$ und $\sin lca = \sin acg$.

Berücksichtigt man diese Gleichheit der Sinus und multiplicirt die drei zuvor aufgestellten Gleichungen miteinander, so findet sich leicht $\frac{n \,.\, la \,.\, cg}{lc \,.\, ag} = \frac{\sin lad \,.\, \sin lca \,.\, \sin cag}{\sin cag \,.\, \sin lac \,.\, \sin acg} = 1$, oder $n \,.\, la \,.\, cg = lc \,.\, ag$, oder endlich, wenn man die obige abkürzende Bezeichnungsweise einführt, $n \,.\, e(s - r) = (e + r)s$, und hieraus

$$s = \frac{enr}{en - e - r}. \quad (1)$$

Durch diese Gleichung erfährt man die Entfernung des Punktes g von der Linse, in welchem der bei a gebrochene Strahl die Axe schneiden würde, wenn er nicht an der zweiten Fläche der Linse einer abermaligen Brechung unterworfen wäre. Da nun der Strahl ab bei b aus der Substanz der Linse wieder in die Luft übergeht, so hat man hier das Brechungsverhältniss $\frac{\sin c'ba}{\sin l'bo} = \frac{1}{n}$.

Es ist aber ferner $bg : c'g = \sin bc'g : \sin c'bg$ oder $\frac{bg}{c'g} = \frac{\sin bc'g}{\sin c'bg}$, und $c'l' : bl' = \sin c'bl' : \sin bc'l'$ oder $\frac{c'l'}{bl'} = \frac{\sin c'bl'}{\sin bc'l'}$.

Multiplicirt man nun diese drei Gleichungen miteinander, so erhält man $\frac{bg \,.\, c'l'}{n \,.\, c'g \,.\, bl'} = \frac{\sin c'ba \,.\, \sin bc'g \,.\, \sin c'bl'}{\sin l'bo \,.\, \sin c'bg \,.\, \sin bc'l'} = 1$, also $bg \,.\, c'l' = n \,.\, c'g \,.\, bl'$ oder, da nach der obigen Bezeichnungsweise $bg = ig =$

s, $bl' = il' = e'$, $c'l' = r' + e'$, und $c'g = r' + s$ ist, $s(r'+e') = n \cdot e'$ $(r'+s)$, und hieraus $s = \frac{e'nr'}{r' + e' - e'n}$.

Aus dieser Gleichung und der obigen (1) folgt $\frac{enr}{en-e-r} = \frac{e'nr'}{r'+e'-e'n}$ oder $\frac{en-e-r}{er} = \frac{r'+e'-e'n}{e'r'}$, und nach einigen leichten Umformungen die Gleichung

$$\frac{1}{e} + \frac{1}{e'} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right), \quad \text{(I)}$$

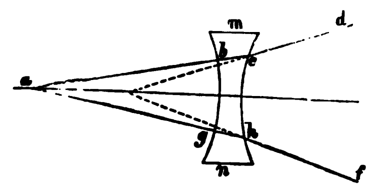
die eine Relation zwischen den Abständen e, e' des leuchtenden Punktes und seines Bildpunktes von der Linse mittelst der Krümmungshalbmesser der letzteren und des Brechungsexponenten giebt. Man kann aus ihr entnehmen, dass die Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte in der Axe ausgehen, nach ihrem Durchgange durch die Linse wieder in einem Punkte der Axe vereinigt werden.

Dieselbe Formel gilt auch für biconcave Linsen, wenn man die Halbmesser r, r' negativ nimmt. Denn bei einer solchen Linse haben die Krümmungsmittelpunkte, im Vergleich zur biconvexen, eine entgegengesetzte Lage. Man hat also für eine biconcave Linse

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{e'} = -(n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right). \quad \text{(II)}$$

Hier ist die Vereinigungsweite e' der Lichtstrahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse negativ, d. h. die Lichtstrahlen, welche divergirend mit der Axe auf eine solche Linse fallen, werden aus der letzteren noch divergirender hervortreten. So wird ein Lichtstrahl ab, der von einem leuchtenden Punkte in der Axe ausgeht, in der Linse mn etwa nach der Richtung be gebrochen werden und dann bei e, in Folge einer neuen Brechung, in der Richtung ed ausfahren. Eben so verhält es sich mit dem Strahl ag, der unter demselben Winkel, mit der Axe, wie ab, auf die Linse trifft.

Fig. 33.



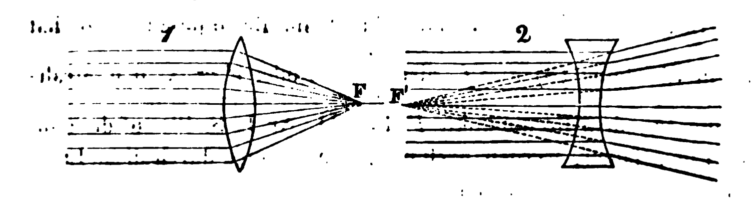
Die von dem leuchtenden Punkte a herkommenden und bei e und d aus der Linse tretenden Strahlen ed und hf können nun wegen ihrer Divergenz nicht zu einer wirklichen Vereinigung in

einem Punkte gelangen. Verlängert man aber ihre Richtungen rückwärts, so werden sich dieselben in einem Punkte in der Axe schneiden, aus welchem die Strahlen *ed* und *hf* herzukommen scheinen. Dies ist die Bedeutung des negativen Werthes der Vereinigungsweite e' bei concaven Linsen.

26. Wenn die Entfernung des leuchtenden Punktes von der Linse sehr gross oder, wie man zu sagen pflegt, unendlich gross ist, so lassen sich die in die Linse fallenden Strahlen als parallel mit der Axe ansehen. Man hat dann $\frac{1}{e} = o$ und die Gleichung (I) S. 48 für biconvexe Linsen verwandelt sich in $\frac{1}{e'} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$. Aus (II) folgt unter derselben Voraussetzung für biconcave Linsen $\frac{1}{e'} = -(n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$.

Fallen also Lichtstrahlen in paralleler Richtung zur Axe auf eine biconvexe Linse (Fig. 34, Nr. 1), so werden sich dieselben nach der Brechung in einem Punkte *F* der Axe vereinigen. Die-

Fig. 34.



sen Punkt nennt man den Brennpunkt und seinen Abstand von der Linse die Brennweite.

Dagegen treten aus einer concaven Linse (Nr. 2) die parallel auf dieselbe fallenden Strahlen divergirend hervor. Denkt man sich aber die ausfahrenden Strahlen rückwärts verlängert, so werden sie die Axe in einem Punkte *F'* schneiden, den man wohl auch den Brennpunkt der concaven Linse nennt, obschon in ihm keine Vereinigung der Lichtstrahlen stattfindet. Derselbe ist mithin nur ein imaginärer Brennpunkt, von welchem die aus der Linse divergent hervortretenden Lichtstrahlen zu kommen scheinen. Deshalb nennt man ihn auch den Zerstreuungspunkt und seine Entfernung von der Linse die Zerstreuungsweite (negative Brennweite).

Bezeichnet man die Brennweite für den Fall $\frac{1}{e} = o$ mit f, so hat man nach den obigen Gleichungen

für biconvexe Linsen $\frac{1}{e} + \frac{1}{e'} = \frac{1}{f}$. (1)

und für biconcave Linsen $\frac{1}{e} + \frac{1}{e'} = -\frac{1}{f}$. (2)

Ein Blick auf diese Gleichungen lehrt, dass für convexe und concave Linsen die Summe aus den umgekehrten Werthen der Vereinigungsweitengleich ist dem umgekehrten Werth der Brennweite.

27. Sind nun bei einer convexen Linse die Werthe von e und f gegeben, so ist nach Gleichung (1) des vorigen §.

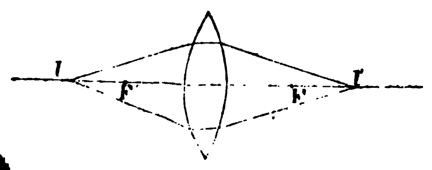
$$\frac{1}{e'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{e}. \quad (3)$$

Liegt der leuchtende Punkt in unendlicher Entfernung von der Linse, ist also $\frac{1}{e} = o$, so folgt $\frac{1}{f} = \frac{1}{e'}$, oder $e' = f$, d. h. die Strahlen vereinigen sich nach ihrem Durchgange durch die Linse in einem Punkte, dessen Abstand von der Linse gleich der Brennweite ist, also im Brennpunkte (Fig. 34, Nr. 1, S. 49).

Liegt aber der leuchtende Punkt im Brennpunkte, so hat man in Gleichung (3) $e = f$, also $\frac{1}{e'} = o$ oder $e' = \infty$, d. h. Strahlen, die von dem Brennpunkte F (Fig. 34, Nr. 1, S. 49) auf die convexe Linse fallen, werden nach ihrem Durchgange durch diese Linse parallel mit der Axe fortgehen.

Befindet sich der leuchtende Punkt l ausserhalb der Brennweite, so hat man $e > f$. Dann ist in Gleichung (3) $\frac{1}{e} < \frac{1}{f}$ und $\frac{1}{e'}$ positiv, d. h. der Vereinigungspunkt l' der von l ausgehenden Strahlen liegt ausserhalb der Brennweite f. Je grösser e ist, desto kleiner ist $\frac{1}{e}$, aber desto grösser $\frac{1}{e'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{e}$, oder um so kleiner e', d. h. desto näher liegt der Vereinigungspunkt der Strahlen an dem Brennpunkte F. Wird $e = 2f$, so ist auch $e' = 2f$, d. h. in diesem

Fig. 35.



Falle sind beide Vereinigungsweiten gleich. Liegt also der leuchtende Punkt in einer Entfernung, die gleich der doppelten Brennweite ist, vor der Linse, so werden die Strahlen hinter der Linse in einem Punkte vereinigt, dessen Entfernung von der Linse ebenfalls gleich der doppelten Brennweite ist.

Liegt der leuchtende Punkt innerhalb der Brennweite, so hat man $e < f$, daher $\frac{1}{e} > \frac{1}{f}$, wo dann $\frac{1}{e'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{e}$ negativ ist. In diesem Falle haben die auf die Linse treffenden Strahlen eine so bedeutende Divergenz, dass dieselbe durch die Linse wohl vermindert, aber doch nicht ganz aufgehoben werden. Die ausfahrenden Strahlen haben, rückwärts verlängert, nur einen imaginären Vereinigungspunkt, aus welchem dieselben divergent auszugehen scheinen. Je kleiner nun e, der Abstand des leuchtenden Punktes von der Linse, ist, desto grösser ist $\frac{1}{e'}$, also um so kleiner e' selbst, d. h. desto näher liegt der scheinbare Vereinigungspunkt der Strahlen an der Linse, und umgekehrt, je näher der leuchtende Punkt am Brennpunkte F liegt, desto weiter liegt der scheinbare Vereinigungspunkt von der Linse ab. Befindet sich der leuchtende Punkt in der Mitte der Brennweite, so ist $e = \frac{1}{2}f$ und $\frac{1}{e'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{e} = \frac{1}{f} - \frac{2}{f} = -\frac{1}{f}$, also $e' = -f$, d. h. der scheinbare Vereinigungspunkt liegt in dem vorderen Brennpunkte. Wenn endlich der leuchtende Punkt der Linse noch näher rückt, kommt der scheinbare Vereinigungspunkt innerhalb der vorderen Brennweite zu liegen.

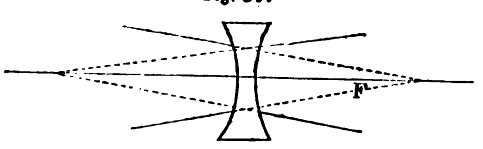
Fig. 86.

Für eine biconcave Linse haben wir, wenn e und f gegeben sind, nach Gleichung (2) §. 26) $\frac{1}{e'} = -\frac{1}{f} - \frac{1}{e}$.

Liegt nun der leuchtende Punkt in unendlicher Entfernung auf der Axe einer solchen Linse, wo also die Strahlen in paralleler Richtung auf dieselbe fallen, so ist $\frac{1}{e} = o$ und daher $\frac{1}{e'} = -\frac{1}{f}$ oder $e' = -f$, d. h. die durch die Linse gebrochenen

Strahlen scheinen von einem Punkte F' vor der Linse auszugehen (Fig. 34, Nr. 2, S. 49). Umgekehrt, wenn Strahlen dergestalt auf diese Linse fallen, dass sie nach dem imaginären Brennpunkte

Fig. 37.



F' hin convergiren, so werden sie nach der Brechung in parallelen Richtungen austreten (Fig. 34, Nr. 2). Convergiren aber die auffallenden Strahlen nach einem Punkte, der weiter von der Linse liegt als der Brennpunkt F (Fig. 37), so divergiren sie auch nachder Brechung so, als ob sie von einem Punkte vor der Linse herkämen.

Wenn der leuchtende Punkt in einer messbaren Entfernung auf der Axe der concaven Linse liegt, behält $\frac{1}{e'}$ und somit auch e' doch stets einen negativen Werth, was die Bedeutung hat, dass immer nur eine scheinbare Vereinigung der gebrochenen Strahlen vor der Linse statt hat, oder dass die Strahlen stets divergirend auf der Hinterseite der Linse hervortreten (Fig. 33, S. 48). Je näher nun der leuchtende Punkt an die Linse heranrückt, d. h. je kleiner e wird, desto grösser wird $\frac{1}{f} + \frac{1}{e}$, also auch $\frac{1}{e'} = -\left(\frac{1}{f} + \frac{1}{e}\right)$, und um so kleiner e' selbst, so dass also der scheinbare Vereinigungspunkt der Linse näher rückt. Liegt der leuchtende Punkt im Brennpunkte selbst, so hat man $e = f$ und $\frac{1}{e'} = -\left(\frac{1}{f} + \frac{1}{e}\right)$ $= -\frac{2}{f}$ oder $e' = -\,{}^1\!/_2 f$, d. h. der scheinbare Vereinigungspunkt der Strahlen liegt für diesen Fall in der Mitte der Brenn- oder Zerstreuungsweite.

28. Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich zwar nur auf biconvexe und biconcave Linsen; allein es hat keine Schwierigkeit, dieselben auf die übrigen Linsen zu erweitern. Setzt man nämlich in der Formel $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$ für biconvexe Linsen (§. 26) den einen Radius, etwa r' negativ, so folgt $\frac{1}{f}$

$= (n-1)\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'}\right)$ für eine concavconvexe Linse (Nr. 3, Fig. 31, S. 44), falls $r < r'$, d. h. der Radius der convexen Seite kleiner als derjenige der concaven genommen wird. Es ist dann $\frac{1}{r} > \frac{1}{r'}$ und der Werth von f positiv; daher eine solche Linse ähnliche Eigenschaften wie die biconvexe darbieten muss. Nimmt man dagegen $r > r'$, also $\frac{1}{r} < \frac{1}{r'}$, so gilt die Formel für eine convex-concave Linse, die sich wegen des negativen Werthes der Brennweite im Wesentlichen eben so wie die biconcave verhält.

Da sich ferner eine Ebene als eine Kugelfläche von unendlich grossem Radius betrachten lässt, braucht man in der Formel für die biconvexe Linse, $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$, nur einen Radius, etwa $r' = \infty$ zu setzen, um sofort den Ausdruck für die Brennweite der planconvexen Linse zu erhalten. Man hat dann $\frac{1}{f} = (n-1)\frac{1}{r}$ oder $f = \frac{r}{n-1}$.

Eine solche Linse wird sich, weil die Brennweite positiv, im Ganzen ebenso wie eine biconvexe verhalten müssen, und nur darin einen Unterschied zeigen, dass ihre Brennweite unter sonst gleichen Umständen grösser als die der biconvexen Linse ist. Hat man z. B. eine biconvexe Linse mit beiderseits gleichen Krümmungshalbmessern, so ist die Brennweite $f = \frac{r}{2(n-1)}$, also nur halb so gross als bei einer planconvexen mit demselben Krümmungshalbmesser r.

Sämmtliche drei Linsen: die biconvexe, planconvexe und concavconvexe sind Sammellinsen; denn sie haben alle, wegen des positiven Werthes ihrer Brennweite, das Gemeinsame, dass parallel auf sie fallende Lichtstrahlen durch die Brechung convergenter gemacht und auf der anderen Seite in einem Punkte vereinigt werden können.

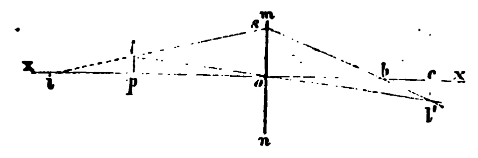
Für eine biconcave Linse hatten wir den Ausdruck $\frac{1}{f} = -(n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$.

Falls die eine Seite einer Hohllinse von einer Ebene gebildet ist, braucht man nur in dieser Formel einen Radius, etwa $r' = \infty$ zu setzen, um für eine planconcave Linse die entsprechende Formel $\frac{1}{f} = -(n-1)\frac{1}{r}$ zu gewinnen.

Da nun die Brennweite sowohl bei der planconcaven als auch bei der convexconcaven Linse negativ auftritt, so müssen ihre Wirkungen im Wesentlichen mit denen der biconcaven übereinkommen; daher auch bei ihnen Lichtstrahlen, die parallel zur Axe auffallen, durch die Brechung zerstreut werden. Um dieser Eigenschaft willen nennt man sie denn auch Zerstreuungslinsen.

29. Es ist erwiesen, dass die bisherigen Betrachtungen über die Wirkung der convexen und concaven Linsen auch dann noch gelten, wenn der leuchtende Punkt nicht auf der Hauptaxe, sondern auf einer sogenannten Nebenaxe liegt, d. h. auf einer graden Linie, die wohl durch den optischen Mittelpunkt, aber nicht durch die Krümmungsmittelpunkte der Linse geht. In nebenstehender Figur bezeichne *mn* beispielsweise eine Convexlinse und *xx* sei ihre Hauptaxe. Hat nun ein leuchtender Punkt *l* eine solche Lage, dass der durch die Mitte *o* der Linse gehende Lichtstrahl mit der

Fig. 38.



Axe nur einen kleinen Winkel macht, so lässt sich dieser Strahl, der sog. Hauptstrahl, als Axe für alle vom Punkte *l* auf die Linse fallenden Strahlen ansehen. Es gelten dann hier dieselben Gesetze wie in dem Falle, wo der leuchtende Punkt sich auf der Axe der Linse befindet. Für den leuchtenden Punkt *l*, der in dem Abstande *lp* von der Axe der Linse liegt, ist *lol'* der Hauptstrahl, der so gut als ungebrochen durch die Linse gehen wird, falls die Dicke der letzteren nur sehr gering ist und die berührenden Ebenen an dem Ein- und Austrittspunkte des Strahles als parallel angesehen werden können. Ein anderer Lichtstrahl, der von *l* ausgeht und die Linse in *s* trifft, wird rückwärts verlängert, die

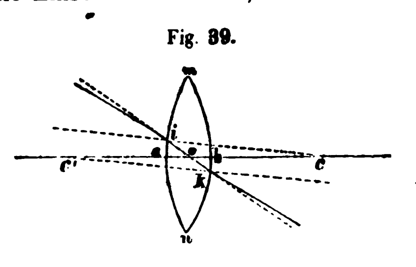
Hauptaxe im Punkte i schneiden, den man als scheinbaren Ausgangspunkt des Strahles ls betrachten kann. Nach der Brechung wird der austretende Strahl die Axe xx in einem Punkte b schneiden, dessen Lage gegeben ist durch die Gleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{io} + \frac{1}{ob}$, wo f die Brennweite der Linse bezeichnet. Denkt man sich nun den Strahl sb bis zu seinem Durchschnitt mit dem Hauptstrahle ll' verlängert, so erhält man als Vereinigungspunkt der Strahlen den Punkt l' in einer Entfernung $l'o$ von der Linse und in einem Abstande $l'c$ von der Axe der letzteren. Sucht man aber für die Lage des Punktes l' die Bedingungsgleichung, so findet sich $\frac{1}{f} = \frac{1}{lo} + \frac{1}{ol'}$, woraus folgt, dass für einen ausserhalb der Axe liegenden Punkt, den man auf den Hauptstrahl bezieht, dieselben Verhältnisse gelten müssen, wie für einen auf der Axe befindlichen leuchtenden Punkt. Daher werden unter der gemachten Voraussetzung alle von jenem Punkte ausgehenden und die Linse treffenden Strahlen sich wieder in einem Punkte vereinigen. Bezeichnet man lo mit e und ol' mit e', so hat man wieder für convexe Linsen $\frac{1}{e} + \frac{1}{e'} = \frac{1}{f}$ und für concave $\frac{1}{e} + \frac{1}{e'} = -\frac{1}{f}$.

Setzt man endlich $po = a$, $oc = a'$, $pl = \alpha$ und $cl' = \alpha'$, so bestehen wegen der ähnlichen Dreiecke lop und $l'oc$ die Proportionen $a' : a = e' : e$ und $\alpha : \alpha' = \alpha : \alpha'$, also auch die Gleichungen $a' = a \cdot \frac{e'}{e}$ und $\alpha' = \alpha \cdot \frac{a'}{a} = \alpha \cdot \frac{e'}{e}$, die zur Bestimmung der Lage des Vereinigungspunktes dienen können.

Im Vorstehenden wurde angenommen, dass ein durch den optischen Mittelpunkt der Linse gehender Lichtstrahl so gut als ungebrochen durch dieselbe hindurchgehe. Der optische Mittelpunkt ist aber ein Punkt in der Axe der Linse, von der Art, dass für jeden durch ihn hindurchgehenden und innerhalb der Linse gebrochenen Strahl der zugehörige einfallende und austretende Strahl einander parallel sind. Um dieses Parallelismus willen kann man nun eben annehmen, dass jeder den optischen Mittelpunkt treffende Lichtstrahl so gut als ungebrochen, d. h. nahezu in unveränderter Richtung durch die Linse hindurchgeht, obschon er ein wenig nach der Seite hin verschoben wird. Es sei mn eine

Linse von geringer Dicke, c der Mittelpunkt der Kugelfläche man und c' der Mittelpunkt der Fläche mbn. Ein Lichtstrahl falle auf die Linse im Punkte i; zu diesem Punkte ziehe man als Einfallsloth den Halbmesser ci und zu dem letzteren parallel den Halbmesser $c'k$. Verfolgt nun der Strahl innerhalb der Linse die Richtung ik, so wird er bei k nach einer Richtung fortgehen, die mit der Richtung des einfallenden Strahles parallel ist. Denn da die Halbmesser ci und $c'k$ einander parallel sind und der Strahl in der Linse mit diesen Einfallslothen gleiche Winkel einschliesst, müssen auch der austretende und einfallende Strahl einander parallel sein. Der Punkt o, durch welchen der Strahl ik hindurchgeht, ist nun der optische Mittelpunkt.

Fig. 39.

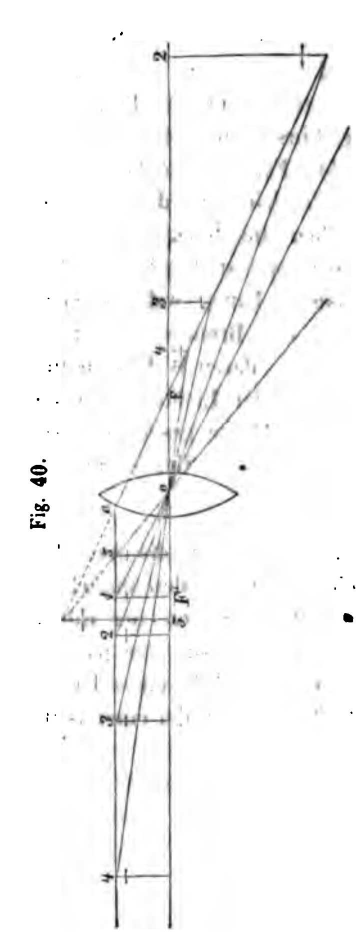


Wir haben die Proportion $ci : c'k$ oder auch $ca : c'b = co : c'o$ und demnach $ca - co : c'b - c'o = co : c'o$ oder $oa : ob = co : c'o$, oder, wenn man $co = r$, $c'o = r'$, die Dicke ab der Linse $= d$, und $oa = x$ setzt, $x : d - x = r : r'$, und hieraus $x = \frac{dr}{r+r'}$ und $ob = d - x = \frac{dr'}{r+r'}$.

Die Lage des Punktes o erscheint also unabhängig von der Richtung des austretenden und einfallenden Strahles oder unabhängig von der Entfernung des Einfallpunktes i von der Axe der Linse.

Für concave Linsen sind die Werthe von r und r' negativ zu nehmen. Ist nun die Linse biconvex oder biconcav und $r = r'$, so folgt aus den obigen Formeln für x und $d - x$, dass der optische Mittelpunkt in der Mitte der Linse liegt; wogegen dieser Punkt bei einer concavconvexen oder convexconcaven Linse ausserhalb derselben befindlich ist.

30. Betrachten wir nun die Bilder, welche durch die Wirkung der Linsen von leuchtenden Gegenständen erzeugt werden. In nachstehender Figur sei der leuchtende Gegenstand ein Kreuz, welches senkrecht auf der Axe der Linse steht, und zwar in verschiedenen Entfernungen von der letzteren. Zur Feststel-


Fig. 40.

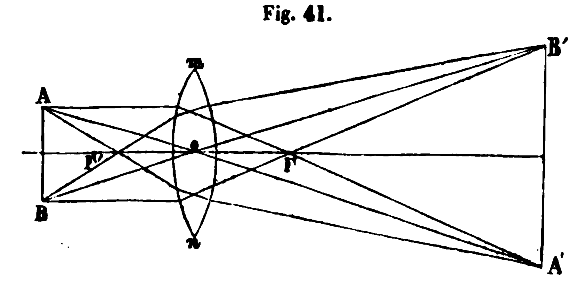
lung der Bilder genügt es, wenn man die von der Spitze und dem Fusspunkte des leuchtenden Gegenstandes herkommenden Strahlen in Betracht zieht. Die Strahlen, welche gerade vom Fusspunkte herkommen, werden die Richtung der Axe einhalten, während die von der Spitze des Gegenstandes ausgehenden Strahlen nach ihrer Brechung durch die Linse auf den entsprechenden Hauptstrahlen 01, 02, 03, 04, ... ihre Vereinigung finden. Die mit der Axe parallelen Strahlen werden aber so gebrochen, dass sie durch den Brennpunkt *F* (rechts) gehen. Da, wo diese Strahlen den betreffenden Hauptstrahl schneiden, liegt der Vereinigungspunkt aller von der Spitze ausgehenden Strahlen, d. h. das Bild der Spitze. Hiernach ergiebt sich leicht die Stellung und Entfernung der Bilder, wie sie in der Figur angegeben sind. Das leuchtende Object ist an seiner Spitze, das entsprechende Bild an seinem Fusspunkte mit derselben Zahl bezeichnet.

In Hinsicht auf das Kreuz 4 haben wir als Hauptstrahl 04, der von dem parallelen Strahle 4a auf der anderen Seite der Linse geschnitten wird; zieht man von diesem Durchschnittspunkte eine Senkrechte auf die Axe, so erhält man ausserhalb der Brennweite *oF* das verkehrte verkleinerte Bild des Objects 4. Ebenso finden sich die Bilder der Kreuze 3 und 2. Steht das Object im Brennpunkte *F* der Linse, so ist der verlängerte Hauptstrahl 01 mit dem gebrochenen und durch den Brennpunkt *F* gehenden Strahl *aF* parallel. Es giebt also keinen Vereinigungspunkt dieser Strahlen, oder dieser Punkt liegt, wie man zu sagen pflegt, in unendlicher Entfernung von der Linse. Steht aber das leuchtende Ob-

ject, wie 5, innerhalb der Brennweite oF', so fahren die Strahlen $5o$ und aF divergent aus der Linse, und haben ihren scheinbaren Vereinigungspunkt vor der Linse, so dass in diesem Falle ein aufrechtes, vergrössertes Bild vor der Linse entsteht. Dagegen haben die Bilder in den vorhergehenden Fällen, wo das Object ausserhalb der Brennweite stand, im Vergleich zu diesem eine umgekehrte Stellung. Auch entstehen hier die Bilder durch eine wirkliche Vereinigung der Lichtstrahlen; sie sind physische Bilder, die man auf einer Fläche auffangen kann, während man die Bilder von Objecten, die innerhalb der Brennweite stehen, geometrische oder virtuelle Bilder nennt, deren Wahrnehmung durch das Auge in Folge einer Vereinigung der Lichtstrahlen auf der Netzhaut desselben, in ganz ähnlicher Weise geschieht, wie die virtuellen Bilder eines Planspiegels oder eines Convexspiegels wahrgenommen werden.

Steht der leuchtende Gegenstand so, dass er die Axe der Linse senkrecht durchschneidet, so gelten auch für den unterhalb der Axe liegenden Theil die vorher zur Construction der Bilder aufgestellten Bestimmungen. Immer genügt ein zur Axe parallel laufender Strahl und ein Hauptstrahl, um das Bild eines leuchtenden Punktes zu ermitteln. Befindet sich z. B. auf der einen Seite

Fig. 41.

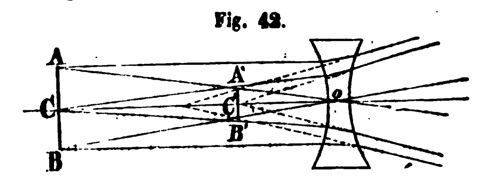


der Linse ausserhalb ihrer Brennweite oF' der leuchtende Gegenstand AB, so vereinigen sich die von A ausgehenden Strahlen in A' zu einem Bilde des Punktes A, und in gleicher Weise entsteht in B' das Bild des Punktes B. Also ist $A'B'$ das Bild des Gegenstandes AB. Nun besteht die Proportion $AB : A'B' = oA : oA'$, wo für $oA < oA'$ auch $AB < A'B'$ ist. Das Bild rückt um so weiter von der Linse hinweg und wird desto grösser, je näher der Gegen[illegible] Brennpunkte F' kommt. Bild und Gegenstand sind

aber gleich gross, wenn der letztere um die doppelte Brennweite $= 2oF'$ von der Linse absteht; denn in diesem Falle werden sich bekanntlich die von den verschiedenen Punkten des Gegenstandes ausgehenden Strahlen auf der anderen Seite der Linse in der bezeichneten Entfernung wieder sammeln und hier ein Bild des Gegenstandes geben. Steht endlich der Gegenstand weiter als um die doppelte Brennweite von der Linse ab, so ist das Bild desselben der letzteren viel näher. Wäre unter dieser Voraussetzung z. B. $A'B'$ der Gegenstand, so würde AB sein umgekehrtes, verkleinertes Bild sein.

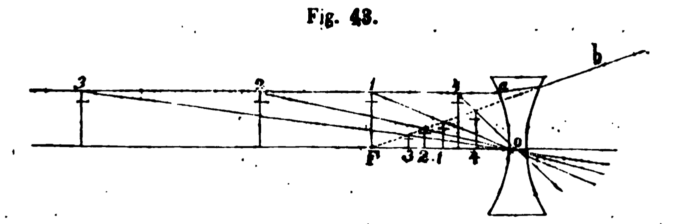
31. Uebergehend zu den Bildern der Hohllinse erinnern wir uns aus §. 25 (Fig. 33), dass Lichtstrahlen, die von einem leuchtenden Punkte auf eine derartige Linse fallen, nach der Brechung so divergiren, als ob sie von einem der Linse näher gelegenen Punkte herkämen. So werden die von den Punkten A und B eines leuchtenden Objects parallel mit der Linsenaxe ausgehenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse so divergiren, dass sie sich rückwärts verlängert in dem imaginären Brennpunkt vereinigen. Ihre Verlängerungen schneiden aber die Hauptstrahlen Ao und Bo in den Punkten A' und B', und hier befinden sich auch die Bilder der Objectpunkte A und B. Andere Strahlen, die von dem Objectpunkte C ausgehen, convergiren nach ihrer Brechung rückwärts verlängert im Bildpunkte C'. Da nun ganz Aehnliches von jedem Punkte eines leuchtenden Gegenstandes AB gilt, der seine Strahlen auf die Hohllinse sendet, so können diese Strahlen kein Sammelbild geben, das sich gleich dem leuchtenden Gegenstande verhält, sondern nur ein sog. virtuelles Bild $A'B'$, welches dem Auge, das die divergent ausfahrenden Strahlen vereinigt, aufrecht und verkleinert erscheint. Man hat hier $AB : A'B' = oA : oA'$, wo $oA > oA'$ und auch stets $AB > A'B'$ ist.

Fig. 42.



Zur weiteren Erläuterung rücksichtlich der Grösse und Stellung der Bilder, die demselben Gegenstande in verschiedenen Entfernungen entsprechen, diene die umstehende Figur. Der leuchtende Gegenstand ist wieder ein Kreuz, an der Spitze mit den

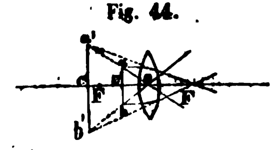
Fig. 43.



Zahlen 1, 2, 3, 4 bezeichnet, während die entsprechenden Bilder mit denselben Zahlen am Fusspunkte bezeichnet sind. Nun finden die von dem Fusspunkte des leuchtenden Gegenstandes ausgehenden Strahlen ihren Vereinigungspunkt in der Hauptaxe oF, die von der Spitze herkommenden aber im Durchschnittspunkte des Hauptstrahles 01, 02, 03, 04 und des rückwärts verlängerten Strahles b, der von den parallel mit der Axe auffallenden Strahlen 1a, 2a, 3a, 4a herrührt, welche letztere Strahlen so gebrochen werden, als ob sie von dem Punkte F herkämen. Alle Bilder liegen innerhalb der Brennweite; sie erscheinen aufrecht und verkleinert und werden um so grösser, je näher das Object der Linse rückt.

32. Wir sahen oben bei den Bildern einer convexen Linse, dass letztere von einem leuchtenden Gegenstande, der innerhalb der Brennweite steht, ein virtuelles Bild giebt, das aufrecht und vergrössert vor der Linse erscheint. Hierauf beruht nun die Wirkung der Loupe und des einfachen Mikroskopes, die man bekanntlich zum Betrachten naher kleiner Objecte benützt. Die Loupe ist eine Convexlinse, deren Brennweite etwa $^1/_2$ bis 2 Zoll beträgt, das einfache Mikroskop eine solche von noch geringerer Brennweite. Man hat in nebenstehender Figur, die den Durchschnitt einer derartigen Linse vorstellen mag, $a'b' : ab = o'c : oc$, wonach das Bild $a'b'$ um so grösser ist, je näher das Object ab der Linse liegt. Hierbei setzen wir voraus, dass die Dicke der Linse nur unbedeutend ist, so dass man sich das der Linse nahe gehaltene Auge allenfalls im optischen Mittelpunkt derselben denken kann.

Fig. 44.



Es ist also $\frac{a'b'}{ab} = \frac{oc'}{oc}$, wobei wir annehmen, dass der Gegenstand sich in einer solchen Entfernung von der Linse befindet, dass das Bild $a'b'$ dem Auge deutlich erscheint. Für eine Con-

vexlinse gilt aber die Formel (S. 50) $\frac{1}{e} + \frac{1}{e'} = \frac{1}{f}$, wo f die Brennweite der Linse, e die Entfernung des Objects und e' die Entfernung des Bildes von derselben bezeichnet. Hier ist nun $oc = e$, oc' aber, wegen der Lage des Bildes oder weil oc kleiner als die Brennweite f ist, $= -e'$, daher $\frac{1}{oc} - \frac{1}{oc'} = \frac{1}{e} - \frac{1}{e'} = \frac{1}{f}$, und $\frac{oc'}{oc} = 1 + \frac{oc'}{f} = 1 + \frac{e'}{f}$ als Werth der durch die Linse bewirkten Vergrösserung. Indessen begnügt man sich gewöhnlich mit dem Quotienten $\frac{e'}{f}$, da e' meist viel grösser als f ist.

Demnach ist bei einem einfachen Mikroskope die lineare Vergrösserung gleich dem Quotienten aus der Brennweite f in die von der individuellen Beschaffenheit des Auges abhängige Entfernung e', worin das Bild $a'b'$ deutlich erscheint. Das Quadrat dieses Quotienten giebt die Flächenvergrösserung. So ist also die Vergrösserung einer Linse um so bedeutender, je kleiner deren Brennweite ist. Wenn aber diese letztere als constant angenommen wird, so wächst jene mit der Entfernung e', weshalb man denn auch sagt, dass eine und dieselbe Linse unter sonst gleichen Umständen für ein weitsichtiges Auge stärker vergrössere als für ein kurzsichtiges. — Entfernt sich das Auge vom Glase, so erscheint zwar das betrachtete Object mehr vergrössert, aber das Gesichtsfeld, d. h. der Raum, welcher durch die Linse auf einmal übersehen werden kann, wird dann auch um so kleiner.

Da das Bild durch die Vergrösserung lichtschwächer wird, erfordern starke Vergrösserungen eine starke Beleuchtung. Die letztere muss im Verhältniss des Quadrates der Vergrösserung gesteigert werden, wenn Bild und Gegenstand gleiche Helligkeit haben sollen. Denn die vom Object kommenden Lichtstrahlen erleuchten auch das Bild, dessen Fläche im Quadrate der linearen Vergrösserung $\left(\frac{e'}{f}\right)$ grösser als die beleuchtete Fläche des Objects, und darum in demselben Verhältnisse lichtschwächer als die letztere ist. Sieht das Auge ein Object ohne Linse, so empfängt es von jedem Punkte dieses Objects einen Lichtkegel, dessen Basis die Pupille ist, während unter Mitwirkung der Linse die Weite des

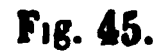
Strahlenkegels durch die Linsenöffnung bedingt ist. Nimmt man nun an, dass das Bild des Objects in beiden Fällen, mit und ohne Linse, auf der Netzhaut des Auges gleich gross ist, so könnte man, wenn die Lichtstärke bei freiem Auge als Einheit betrachtet wird, die Lichtstärke bei Anwendung der Linse $= \frac{r^2}{p^2}$ setzen, wo r der Halbmesser der Linsenöffnung und p der Halbmesser der Pupille ist. Da aber das Bild unter Mitwirkung der Linse grösser ist, in der Art, dass nach dem Obigen die Flächenvergrösserung $\frac{e'^2}{f^2}$ beträgt, so ist die Lichtstärke oder Helligkeit des Bildes in diesem Verhältnisse kleiner, also $= \frac{r^2 f^2}{e'^2 p^2}$.

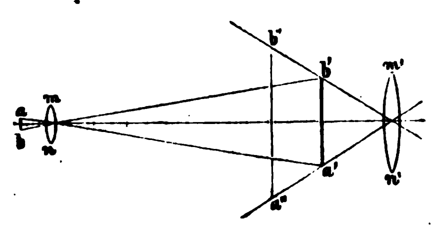
Um eine grössere Lichtstärke und ein grösseres Gesichtsfeld zu gewinnen, pflegt man wohl auch zwei oder selbst drei Convexlinsen dicht hintereinander anzuwenden, die zusammen noch immer als ein einfaches Mikroskop oder als eine Loupe wirken. Eine einzige Convexlinse müsste, wenn sie dieselbe Vergrösserung wie diese Combination gewähren sollte, eine geringere Brennweite, also auch eine geringere Oeffnung als die einzelnen Linsen der Combination haben. Dazu kommt noch, dass eine einzige Convexlinse von geringerer Brennweite wegen der grösseren sphärischen Abweichung auch eine geringere Deutlichkeit der Bilder gewährt.

Eine Loupenvorrichtung, die sich zweckmässig als Zeichenapparat zur Abbildung verschiedener Gegenstände in verschiedener Grösse gebrauchen lässt, hat v. Hagenow unter dem Namen eines „Patent-Dicatopters" hergestellt.*)

33. Das **zusammengesetzte dioptrische Mikroskop** besteht im Allgemeinen aus zwei Convexlinsen, von denen die eine, die sog. **Objectivlinse**, dem Gegenstande zugekehrt ist, während die andere, die sog. **Ocularlinse**, als einfaches Mikroskop oder Loupe dient, durch welches die von der Objectivlinse erzeugten physischen Bilder betrachtet werden. Ein Object ab, welches vor der Objectivlinse mn ein wenig ausserhalb ihrer Brennweite steht, erzeugt hinter dieser Linse ein verkehrtes und vergrössertes Bild $a'b'$, welches, durch die Ocularlinse $m'n'$ be-

*) s. Poggend. Ann. Bd. LXXXVIII. S. 242.





trachtet, wie der Gegenstand eines einfachen Mikroskopes, vergrössert erscheint, in der Art, dass es das virtuelle Bild $a''b''$ ist, welches man vermittelst des Auges wahrnimmt.

Nähert sich das Object bei unveränderter Entfernung der Ocular- und Objectivlinse dem Brennpunkte der letzteren, so entfernt sich das physische Bild auf der anderen Seite von der Objectivlinse nach dem Ocular hin und wird zugleich etwas grösser, während die durch das Ocular bewirkte Vergrösserung vermindert wird. Nun muss aber ein kurzsichtiges Auge, dessen deutliche Sehweite geringer als die eines weitsichtigen ist, im Vergleich zum letzteren das Bild näher am Ocular haben, was sich eben dadurch bewerkstelligen lässt, dass man das Object dem Brennpunkte der Objectivlinse um etwas näher bringt. Doch kann derselbe Zweck auch dadurch erreicht werden, dass man das Ocular um einen gewissen Betrag dem Objectiv nähert, ohne die Entfernung des Gegenstandes vom letzteren zu verändern.

Die Objectiv- und Ocularlinse eines solchen Mikroskopes können, wie wir hier angenommen haben, beide einfach sein. Da jedoch einfache Linsen gewisse Abweichungen (s. weiterhin) darbieten, welche die Schärfe und Deutlichkeit der Bilder beeinträchtigen, so wählt man meist eine solche Combination mehrerer einfacher Linsen, durch welche jene Abweichungen beseitigt werden.

Die Beleuchtung der Objecte geschieht, wenn sie durchsichtig sind, gewöhnlich mittelst eines Plan- oder Hohlspiegels, bei undurchsichtigen (opaken) dagegen durch eine Sammellinse.

34. Die Vergrösserung nun, welche ein zusammengesetztes Mikroskop bewirkt, lässt sich zwar durch Rechnung bestimmen, wenn die Brennweite beider Linsen und die Entfernung der letzteren von einander und vom Objecte gegeben sind; allein es ist einfacher, dieselbe direct durch den Versuch zu ermitteln. Hierzu

kann man sich zweckmässig eines Verfahrens von v. Jacquin*) bedienen. Man legt nämlich als Object ein Mikrometer unter und befestigt bei senkrechter Stellung des Mikroskopes oberhalb des Oculars einen kleinen Planspiegel so, dass er gegen die Axe des Instruments um 45° geneigt ist. Dem Planspiegel gegenüber befindet sich in der Weite des deutlichen Sehens ein in Linien getheilter Stab, dessen Bild mit dem vergrösserten Bilde des Mikrometers im Spiegel übereinander fällt. Sieht man nun nach, wie viele Abtheilungen der Mikrometertheilung auf eine Abtheilung des Massstabes gehen, so ergiebt sich daraus leicht die Vergrösserung des Instrumentes. Gesetzt, n Theile des Mikrometers fielen auf 1 Zoll des Massstabes, und dieser Zoll sei $= m$ Theilen des Mikrometers, so wäre die Vergrösserung durch den Quotienten $\frac{m}{n}$ gegeben.

Hat man mehrere Mikroskope miteinander zu vergleichen, so lassen sich hierzu sehr wohl die von Nobert**) hergestellten Glasmikrometer gebrauchen. Ein solches Mikrometer enthält zehn Gruppen feiner Linien, so dass der Abstand der einzelnen Linien jeder Gruppe einen sehr kleinen Bruchtheil einer Pariser Linie beträgt. Für die gedachten zehn Gruppen ist der Abstand der einzelnen Linien durch folgende Zahlen in Millionentheilchen einer Par. Linie gegeben.

1000	463
857	397
735	340
630	292
540	225.

Betrachtet man nun dieses Mikrometer durch ein Mikroskop, so wird die Güte des letzteren um so höher zu schätzen sein, je feiner die Gruppe ist, deren Linien durch das Mikroskop noch deutlich getrennt erscheinen.

Will man die Grösse eines kleinen Gegenstandes bestimmen, so kann man hierzu bei mässigen Vergrösserungen ein Glasmikrometer benutzen, auf dem eine gegebene Linie in zehn oder hundert gleiche Theile getheilt ist. Man legt das Mikrometer in ge-

*) Wiener Zeitschrift. Bd. IV. S. 5; vgl. auch Bd. V. S. 316.

**) Poggend. Ann. Bd. LXVII. S. 173.

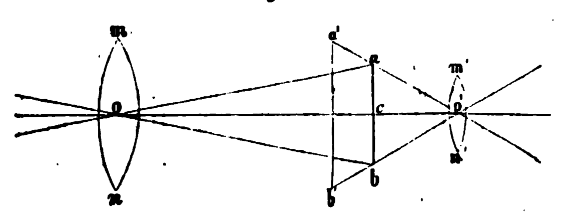
eigneter Weise auf den Objectträger des Mikroskopes und auf dasselbe den betreffenden kleinen Gegenstand, um nachzusehen, wie viele Abtheilungen jener Linie von diesem Gegenstande bedeckt werden. Zu demselben Behufe dient nach Fraunhofer ein Schraubenmikrometer. Ueber die Fassung des Oculars ist nämlich ein feiner Faden gespannt, mit dem man eine Seite vom Bilde des mikroskopischen Objects in Berührung bringt. Hierauf verschiebt man den Objectträger durch Umdrehung einer Mikrometerschraube so lange, bis auch die andere Seite des Bildes den Faden berührt. Kennt man nun die Weite eines Schraubenganges, so ist durch die Anzahl der Umdrehungen der Schraube die Länge bestimmt, um welche der bewegliche Objectträger verschoben werden musste, um auch die andere Seite des Objects mit dem Faden in Berührung zu bringen. Diese Länge ist gleich dem Durchmesser des kleinen Objects.

Ausser den dioptrischen Mikroskopen, die wir bisher betrachtet haben, giebt es noch sog. Spiegelmikroskope oder katoptrische Mikroskope, bei welchen die Objectivlinse der ersteren durch einen geeigneten Hohlspiegel ersetzt ist. So fallen bei dem Amici'schen Spiegelmikroskope*) die Lichtstrahlen von dem beleuchteten Objecte auf einen kleinen Planspiegel von Metall und von diesem auf einen (elliptischen) Hohlspiegel, der an dem entgegengesetzten Ende des Rohres ein Bild entwirft, das durch ein Ocularglas, wie bei dem dioptrischen Mikroskope, betrachtet wird.

35. Die bereits dargelegten optischen Gesetze gewähren uns zugleich eine allgemeine Einsicht in die Wirkung der Fernröhre, die bekanntlich zum deutlichen Sehen entfernter Objecte benutzt werden. Das astronomische Fernrohr (Fig. 46) besteht in seiner einfachsten Gestalt aus einer convexen Objectiv- und aus einer ebenfalls convexen Ocularlinse, die beide höchstens nur die Summe ihrer Brennweiten von einander entfernt sind. Nun werden die von einem entfernten Gegenstande kommenden Lichtstrahlen durch die Objectivlinse mn zu einem verkehrten Bilde ab vereinigt, das durch das Ocular $m'n'$ betrachtet in $a'b'$ vergrössert erscheint. Mit freiem Auge erscheint der Gegenstand wie das Bild ab vor

*) Vgl. Dingler's polytech. Journ. Bd. XXXII. Hft. 4.


Fig. 46.



der Mitte des Objectivs aus betrachtet, nämlich unter dem Winkel aob, während man ihn durch das Instrument so sieht, wie das Bild ab von der Mitte des Oculars aus, d. h. unter dem Winkel $ao'b$. Es ist also $\frac{ao'b}{aob} = \frac{oc}{o'c}$, wo oc die Brennweite des Objectivs und $o'c$ die des Oculars ist. Strenger genommen hat man tang. $ao'c = \frac{ac}{co'}$, und tang. $aoc = \frac{ac}{co}$, daher $\frac{\text{tang.}\, ao'c}{\text{tang.}\, aoc} = \frac{co}{co'}$. Da jedoch die bezeichneten Winkel nur klein sind, so lässt sich setzen $\frac{ao'c}{aoc} = \frac{co}{co'}$, also auch $\frac{ao'b}{aob} = \frac{co}{co'}$.

Die Vergrösserung ist mithin gleich dem Quotienten aus der Brennweite des Oculars in die des Objectivs, und demnach bei demselben Objectiv um so bedeutender, je kleiner die Brennweite des Oculars ist. Indessen darf die Vergrösserung bei einem und demselben Objectiv eine gewisse Grenze nicht überschreiten, weil mit einer Verminderung der Brennweite des Oculars die Oeffnung desselben kleiner und damit auch das Gesichtsfeld des Fernrohres enger wird. Die Helligkeit des Bildes ist hingegen durch die Oeffnung des Objectivs bedingt.

An dem Orte, wo sich das durch die Objectivlinse erzeugte Bild befindet, ist ein Fadenkreuz ausgespannt, welches sowohl zum Einvisiren der Objecte als auch zu messenden Beobachtungen dient. Der Kreuzungspunkt der Fäden liegt in der optischen Axe des Fernrohres, die auch die Brennpunkte der Linsen enthält. Ist diese Bedingung erfüllt, so nennt man das Fernrohr centrirt.

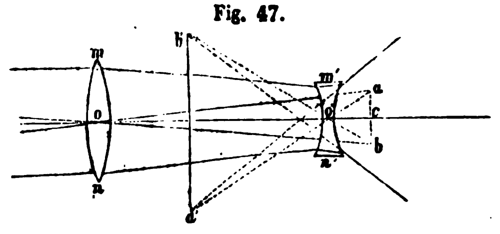
Die Ocular- und Objectivlinse lassen sich innerhalb gewisser Grenzen einander nähern oder von einander entfernen, weil die ungleiche Entfernung der zu sehenden Objecte und die Beschaffenheit des Auges, je nachdem es kurz- oder fernsichtig ist, einen verschiedenen Abstand der Linsen zum Behufe der Erzeugung deut-

licher Bilder erforderlich macht. Sodann ist am Orte des physischen Bildes meist noch ein kreisförmiger Ring (Diaphragma) mit einer der Grösse des Bildes entsprechenden Oeffnung angebracht, um alles Licht, welches die Deutlichkeit dieses Bildes beeinträchtigen könnte, möglichst zu beseitigen. An diesem Ringe ist auch das bereits erwähnte Fadenkreuz befestigt.

Das astronomische Fernrohr giebt ein verkehrtes Bild, was bei astronomischen Beobachtungen nicht lästig ist, wohl aber bei entfernten terrestrischen Objecten. Man hat daher ein sog. Erdfernrohr construirt, in der Art, dass mit dem Objectiv noch mehrere Convexlinsen verbunden sind, durch welche das vom ersteren herrührende verkehrte Bild nochmals umgekehrt wird, so dass dann der Gegenstand aufrecht erscheint. Indessen lässt sich das Bild des astronomischen Fernrohres auch noch auf andere Art umkehren. So brachte Dove *) zwei gleichschenklige, rechtwinklige Glasprismen in Vorschlag, die eine solche Stellung haben, dass in ihnen das Licht an den Kathetenflächen zweimal gebrochen und an der Hypothenusenfläche total reflectirt wird. Wenn nun beide Prismen mit ihren Brechungsebenen senkrecht auf einander stehen, so kehrt das eine Prisma das Bild des Objects in der Richtung von oben nach unten, das andere dagegen in der Richtung von rechts nach links um. Ein solches Prismensystem nennt man ein Reversionsprisma.

36. Auch das sog. holländische oder galileische Fernrohr, welches als Ocular eine Concavlinse hat, lässt den Gegenstand aufrecht erscheinen. Die Sammellinse *mn*, welche die von einem entfernten Gegenstande kommenden Strahlen auffängt, würde dieselben ohne die Hohllinse *m'n'* zu einem verkehrten physischen

Fig. 47.



Bilde *ab* vereinigen. Nun werden aber diese Strahlen durch das concave Ocular *m'n'*, dessen Entfernung vom Orte des Bildes *ab*

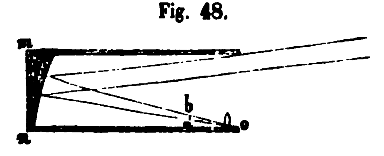
*) Poggendorff's Annal. Bd. LXXXIII. S. 189.

etwas grösser als seine Zerstreuungsweite (S. 49) ist, so gebrochen, als ob sie von dem vergrösserten virtuellen Bilde $a'b'$ herkämen, das die umgekehrte Stellung des gestörten Bildes ab hat, so dass also der durch das Fernrohr gesehene Gegenstand aufrecht erscheinen muss.

Das Bild ab würde von der Mitte des Objectivs aus unter dem Winkel aob erscheinen, und dies ist zugleich der Winkel, unter welchem man den Gegenstand ohne Fernrohr sieht. Dagegen erscheint im Fernrohr der Gegenstand unter dem Winkel $a'o'b = ao'b$, wenn man sich das Auge in der Mitte des Oculars denkt, was ohne merklichen Fehler geschehen kann. Daher hat man für die Vergrösserung dieses Fernrohres $\frac{ao'b}{aob} = \frac{oc}{o'c}$. Setzt man nun die Entfernung $o'c$ des Bildes ab von der Ocularlinse der Zerstreuungsweite der letzteren gleich, was allenfalls erlaubt ist, so ist die Vergrösserung des Fernrohres durch den Quotienten aus der Zerstreuungsweite des Oculars in die Brennweite oc des Objectivs gegeben. Indessen gewährt dieses Fernrohr, weil die aus dem Ocular tretenden Strahlen divergiren und ihrer viele vom Auge abgehalten werden, nur ein verhältnissmässig sehr kleines Gesichtsfeld. Bei den sog. Feldstechern von Plössl, die im Wesentlichen mit dem Galilei'schen Fernrohre übereinstimmen und höchstens eine dreissigmalige Vergrösserung gestatten, befinden sich an einer Drehscheibe mehrere Hohlgläser, vermittelst deren man rasch hintereinander verschiedene Vergrösserungen hervorbringen kann. Auch die gewöhnlichen Theater- und Taschenperspective, mit höchstens fünfmaliger Vergrösserung, sind nach Art des Galilei'schen Fernrohres eingerichtet.

Von den bisher betrachteten dioptrischen Fernröhren unterscheidet man die katoptrischen Fernröhre, bei welchen die Objectivlinse meist durch einen Hohlspiegel ersetzt ist. So besteht z. B. das Herschel'sche Spiegelfernrohr aus einem Hohlspiegel mn, der eine geringe Neigung gegen die Axe der Röhre hat, und aus einem Ocularglase bei o. Die vom Hohlspiegel reflectirten Lichtstrahlen erzeugen am unteren Ende der Röhre ein umgekehrtes, verkleinertes Bild ab des entfernten Gegenstandes, welches durch die Linse bei o betrachtet wird. Da aber hier ein Theil der Lichtstrahlen durch

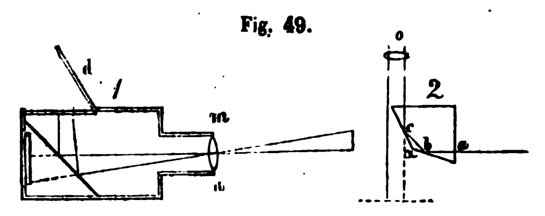
Fig. 48.



den Kopf des Beobachters aufgehalten wird, so muss man dem Hohlspiegel eine bedeutende Grösse geben.

37. Endlich sei auch noch der Camera obscura und lucida gedacht, von denen die erstere bekanntlich so häufig benutzt wird, um scharfe und deutliche Bilder verschiedener, mehr oder minder entfernter, Objecte auf einer ebenen Fläche darzustellen. Die von einem Gegenstande kommenden Lichtstrahlen

Fig. 49.



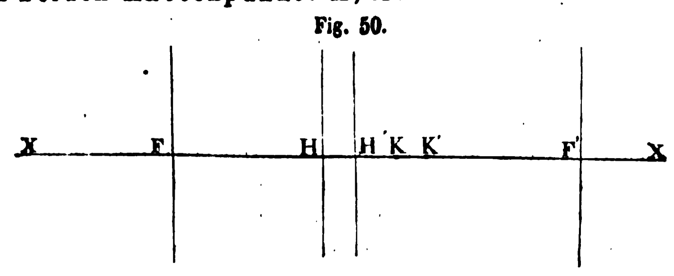
(Fig. 49, N. 1) dringen durch die Linse *mn*, die verschiebbar eingerichtet ist, in einen dunklen Kasten und vereinigen sich hier, z. B. auf einer daselbst befindlichen matten Glastafel, zu einem physischen Bilde des Gegenstandes. Doch können die Lichtstrahlen auch von einem Planspiegel, der unter 45° gegen die Axe der Linse geneigt ist, nach einer horizontalen matten Glastafel reflectirt und hier zu einem Bilde des Gegenstandes vereinigt werden. In diesem Falle dient der Deckel *d* dazu, um fremdes Licht so viel als möglich vom Bilde auszuschliessen.

Die sog. Camera lucida (Fig. 49, Nr. 2), die man zum Nachzeichnen näherer Gegenstände benutzt, besteht aus einem Glasprisma, welches bei *α* einen Winkel von etwa 135° hat, während die beiden Flächen, von denen die eine dem Gegenstande, die andere dem Auge *o* zugekehrt wird, unter einem rechten Winkel zusammenstossen. Ein Lichtstrahl, der von einem leuchtenden Gegenstande kommt und bei *a* in das Prisma eindringt, wird bei *b* und *c* total reflectirt und gelangt so in das Auge *o*. Man sieht dann das Bild des Objects nach der in der Figur angedeuteten Richtung. Liegt daher unterhalb des Prismas ein weisses Papier, so wird auf dieses das Bild des Gegenstandes projicirt, und man kann, wenn das Papier zugleich sein Licht in's Auge sendet, mit einem Bleistifte den Umrissen des Bildes nachfolgen. Auch lässt sich mit diesem Apparate noch eine Linse verbinden, um durch dieselbe das Bild zu betrachten. — Zu demselben Zwecke,

wie diese Camera lucida, dient nach Sömmering auch ein kleines Stahlspiegelchen, das man unter einem Winkel von 45° gegen das Object neigt und nahe am Auge so hält, dass es die Pupille nur zum Theil bedeckt.

38. Die Strahlenbrechung in einem centrirten System verschiedener, sphärisch gestalteter Medien hat Gauss*) einer allgemeineren Untersuchung unterworfen**), die durch Listing***) und später durch Helmholtz****) eine weitere Bearbeitung erfahren und dadurch auch Eingang in die physiologische Optik, nämlich eine Anwendung auf die Lichtbrechung im Auge, gefunden hat. Aus dieser Untersuchung resultirte ein einfaches Verfahren, um in einem solchen Systeme den Gang der gebrochenen Lichtstrahlen und also auch die Lage und Grösse der erzeugten Bilder zu bestimmen. Dabei wird das System der brechenden sphärischen Flächen als centrirt angenommen, d. h. so dass die Mittelpunkte dieser Flächen alle in einer und derselben Geraden liegen, welche zugleich die Axe des Systems ist. Die Untersuchung führte nun zu drei Paaren ausgezeichneter Punkte, der sog. optischen Cardinalpunkte des Systems, vermittelst deren sich die bezeichnete Aufgabe leicht lösen lässt. Diese Punkte sind die **beiden Brennpunkte** F, F', die **beiden Hauptpunkte** H, H', und endlich die **beiden Knotenpunkte** K, K'.

Fig. 50.



*) Dioptrische Untersuchungen. Abhandlungen der Göttinger Gesellschaft, Bd. I. 1838—1843. — Vgl. auch A. Fick: Medic. Physik, Braunsch. 1858. S. 238.

**) s. auch Möbius: Entwickelung der Lehre von den dioptrischen Bildern mit Hülfe der Collineationsverwandtschaft, in Berichten der Königl. Sächs. Ges. der Wiss., Math. Phys. Klasse. Leipz. 1855.

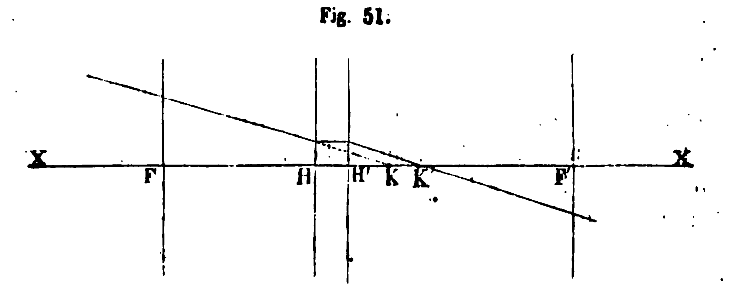
***) Wagner's Handwörterbuch der Physiologie; Bd. IV. Art. Dioptrik des Auges. — Beitrag z. physiolog. Optik in d. Göttinger Studien. 1845.

****) Karsten's allg. Encyclopädie der Physik, Leipz. 1856. Physiolog. Optik. S. 39.

Denkt man sich auf XX, der Axe des Systems, durch *F*, *F'* und *H*, *H'* vertikale Ebenen gelegt, so kann man die durch *F*, *F'* gelegten Ebenen die beiden Brennebenen und die durch *H*, *H'* gehenden die Hauptebenen nennen. Der eine (vordere) Brenn-, Haupt- und Knotenpunkt bezieht sich aber auf den Gang der Lichtstrahlen im ersten brechenden Medium, dagegen der andere (hintere) Brenn-, Haupt- und Knotenpunkt auf die Brechung im letzten Medium.

Geht nun ein Strahl durch den vorderen Brennpunkt *F*, so wird er nach der Brechung parallel mit der Axe fortlaufen. Und umgekehrt werden alle Strahlen, die parallell mit der Axe einfallen, nach der Brechung durch den hinteren Brennpunkt *F'* gehen. Ein Strahl aber, welcher im ersten Medium durch den vorderen Hauptpunkt *H* geht, wird sich nach der Brechung im letzten Mittel durch den hinteren Hauptpunkt *H'* fortpflanzen. Ist endlich Fig. 51

Fig. 51.

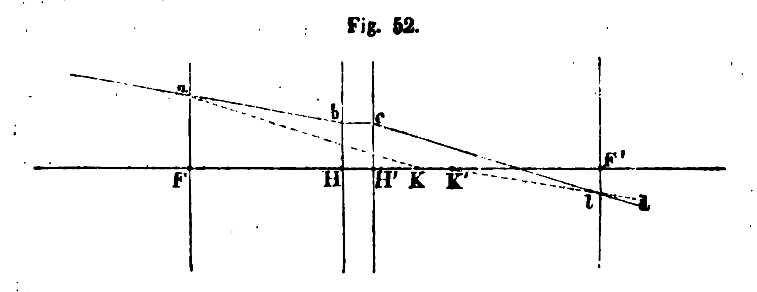


ein Strahl im ersten Medium nach dem vorderen Knotenpunkt *K* gerichtet, so wird er nach der Brechung durch den zweiten Knotenpunkt *K'* gehen, so dass dann die Richtung dieses Strahles zu seiner ursprünglichen Richtung parallel ist. Der Strahl ist also in diesem Falle mit Beibehaltung seiner ursprünglichen Richtung nur um den Abstand der Knotenpunkte längs der Axe verschoben worden. Man kann nun mit Listing eine Gerade, welche vom leuchtenden Gegenstande nach dem vorderen Knotenpunkte gerichtet ist, die erste Richtungslinie (oder Richtungsstrahl) nennen, und die andere durch den zweiten Knotenpunkt gehende, aber zu der vorigen parallele Gerade die zweite Richtungslinie. Alsdann lässt sich kurz sagen, dass ein im Sinne der ersten Richtungslinie einfallender Lichtstrahl nach der Brechung längs der zweiten Richungslinie fortgeht. Alle Strahlen, welche von einem leuchtenden

Punkte in der vorderen Brennebene ausgehen, werden nach der Brechung der eben bezeichneten Richtungslinie parallel sein.

39. Ist nun ein beliebiger Strahl gegeben, welcher die vordere Brennebene in dem Punkte a schneidet, so lässt sich sein Weg im letzten Medium leicht bestimmen. Der Strahl schneide die erste Hauptebene im Punkte b. Man ziehe von diesem Punkte

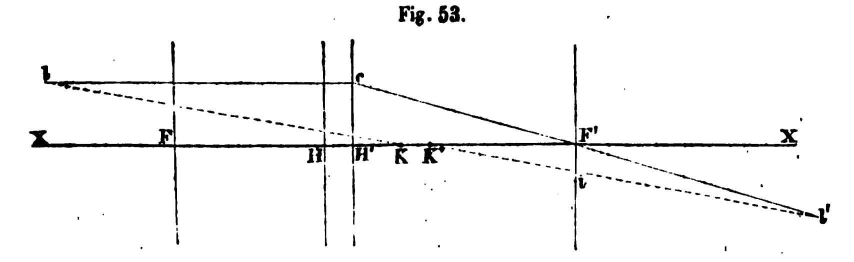
Fig. 52.



parallel zur Axe die Linie bc und überdies von a aus den Richtungsstrahl aK. Mit dem letztern ist nun jeder Strahl, der durch den Punkt a der vorderen Brennebene geht, nach der Brechung parallel. Zieht man also von c aus eine Linie cd parallel mit der Richtungslinie aK, so giebt dieselbe die Richtung des Strahles im letzten Medium an. Oder man ziehe durch den zweiten Knotenpunkt K' die Linie $K'l$ parallel zu dem Strahle ab, und verbinde den Durchschnittspunkt l jener Linie mit der hinteren Brennebene durch eine Gerade mit dem Punkte c, so erhält man gleichfalls die Richtung des gebrochenen Strahles.

Leicht ergiebt sich nunmehr auch der Vereinigungspunkt der Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte durch das brechende System hindurchgehen, oder, mit anderen Worten, die Lage des Bildpunktes. Zwei ausgezeichnete Strahlen sind zu diesem Behufe ausreichend. Es sei l ein leuchtender Punkt ausserhalb der Axe xx. Der Strahl lc, parallel zur Axe, geht nach der

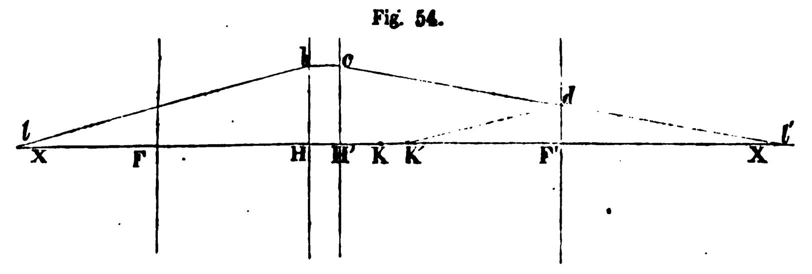
Fig. 53.



Brechung durch den hinteren Brennpunkt F'. Man ziehe nun noch die mit der ersten Richtungslinie lK parallele zweite Richtungslinie $K'i$; wo diese, verlängert, den durch den Brennpunkt F' gehenden Srahl schneidet, liegt das Bild des leuchtenden Punktes l, also in l'.

Wenn der leuchtende Punkt in der Axe liegt, so wird ein mit der letzteren zusammenfallender Strahl ungebrochen durch das

Fig. 54.



System hindurchgehen. Man nehme nun noch irgend einen anderen Strahl, der mit der Achse einen Winkel einschliesst, etwa lb, ziehe zu diesem parallel durch den Knotenpunkt K' die Linie $K'd$ und endlich durch den Punkt d, worin diese Linie die hintere Brennebene schneidet, die Gerade cd. Der Durchschnittspunkt l' der verlängerten cd mit der Axe ist der Ort des gesuchten Bildes vom Punkte l.

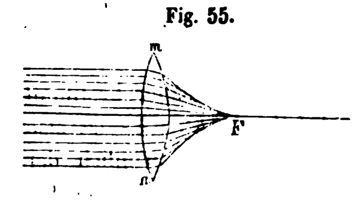
Die Lage der Haupt- und Knotenpunkte ist näher bestimmt durch die Gleichungen $FK = F'H'$ und $FH = F'K'$. Es ist also auch $F'H' - FH = HK = H'K'$, und $HH' = KK'$, nämlich der Abstand der beiden Hauptpunkte gleich dem Abstande der beiden Knotenpunkte. Die beiden Hauptbrennweiten HF und $H'F'$ verhalten sich aber zu einander wie die Brechungsexponenten für das erste und letzte Medium. Bezeichnet nun n den Brechungsexponenten des ersten und n den des letzten Mittels, so hat man $HF : H'F' = n : n'$ oder $\frac{HF}{H'F'} = \frac{n}{n'}$.

Die vorstehenden Betrachtungen passen für das Auge, welches sich als ein System brechender Flächen betrachten lässt, worin das erste und letzte Mittel (Luft und Glasfeuchtigkeit) verschieden sind. Haben aber diese beiden Mittel dieselbe Beschaffenheit, wie bei optischen Instrumenten, wo die aus der Luft einfallenden Lichtstrahlen nach der Brechung wieder in dieselbe eindringen, so hat man $n = n'$, also $\frac{n}{n'} = 1$ und $HF = H'F'$.

40. Unseren bisherigen Entwickelungen der Strahlenbrechung in sphärischen Linsen lag die Voraussetzung zu Grunde, dass die Strahlen unter einem verhältnissmässig sehr kleinen Winkel mit der Axe der Linse auffallen. Nur unter dieser Bedingung können die von einem Punkte ausgegangenen Lichtstrahlen nach der Brechung durch eine Linse wieder in einem Punkte vereinigt werden. Strahlen, welche einen grösseren Winkel mit der Axe machen, also in grösserer Entfernung von der letzteren auf die Linse fallen, werden stärker gebrochen und convergiren demzufolge nach Punkten der Axe, welche der Linse näher liegen. Diese mangelhafte Vereinigung der gebrochenen Strahlen verursacht nun eine Undeutlichkeit des Bildes, die eben ihren Grund in der Gestalt der Linse hat, um derentwillen die Randstrahlen eine stärkere Brechung als die mittleren (centralen) Strahlen erfahren. Daher nennt man dies auch die Abweichung wegen der Kugelgestalt der Linse oder die **sphärische Abweichung**.

Fällt ein Bündel paralleler Lichtstrahlen auf eine biconvexe Linse *mn*, so werden die mittleren der Axe am nächsten liegenden Strahlen im Brennpunkte *F* zur Vereinigung gelangen, während die weiter von der Axe auffallenden sich nach der Brechung vor diesem Punkte schneiden. Sämmtliche Durchschnittspunkte bilden zu beiden Seiten der Axe eine Curve, die man **Brennlinie** nennt.

Fig. 55.

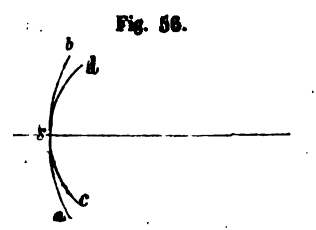


Die äussersten Randstrahlen lassen sich nun durch eine Blendung beseitigen, indem man den Rand der Linse bis zu einer gewissen Breite mit einem undurchsichtigen Schirme bedeckt, wo dann die innere um die Mitte befindliche Fläche der Linse die Oeffnung (Apertur) heisst. Ausserdem hat man noch verschiedene Methoden, um die sphärische Abweichung möglichst zu vermindern. So z. B. nach J. Herschel*) durch Nebeneinanderstellung zweier Linsen von bestimmten Krümmungen. Hätte man statt einer sphärischen Linse, bei welcher die Krümmung überall dieselbe ist, eine ellipsoidisch gestaltete *asb*, deren Krümmung von dem Scheitel *s* an gerechnet nach den beiden Rändern hin abnimmt, so

*) Phil. Transact. for 1821. p. 296.

würde in einer solchen die Brechung der Randstrahlen gewiss geringer ausfallen als in der sphärischen Linse *cd*, und also auch bei jener die Abweichung der Strahlen geringer als bei dieser sein.

Fig. 56.

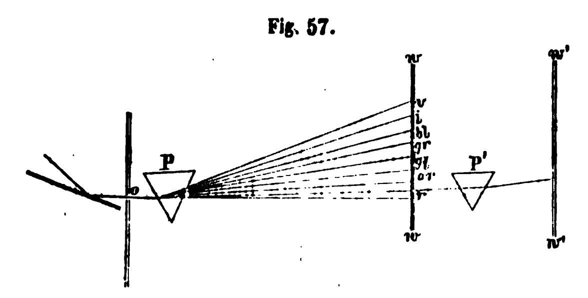


Zweites Kapitel.

Von der Zerlegung und Zusammensetzung des Lichtes. (Farben).

41. Wir wissen (S. 31), dass ein Lichtstrahl, der auf ein prismatisch gestaltetes Medium fällt, eine Richtungsänderung erfährt, dergestalt dass der austretende Strahl von dem einfallenden um einen gewissen Winkel abgelenkt ist. Leitet man nun ein Bündel Sonnenlicht, das man als weisses Licht bezeichnet, mittelst eines Planspiegels durch die Oeffnung *o* eines sonst verfinsterten Zimmers auf ein hier befindliches Prisma *P*, so wird man auf einem gegenüberstehenden weissen Schirme *ww* anstatt des weissen und runden Sonnenbildes, welches man ohne das Prisma wahrnehmen würde, einen farbigen Lichtstreifen *rv* erblicken.

Fig. 57.



Die Breite dieses Lichtstreifens, den man Farbenspectrum oder schlechthin Spectrum nennt, ist gleich dem Durchmesser des gewöhnlichen Sonnenbildchens, während seine Länge sowohl durch den brechenden Winkel als auch durch die brechende Substanz des Prisma bedingt ist. Den Einfluss der letzteren gewahrt man, wenn man ein Hohlprisma, das aus möglichst

ebenen Glasplatten zusammengefügt ist, mit verschiedenen durchsichtigen Flüssigkeiten füllt. Besteht aber die eine Seitenfläche dieses Hohlprisma aus einer beweglichen Glasplatte, so lässt sich der brechende Winkel beliebig ändern und daher auch der Einfluss des letzteren herausstellen.

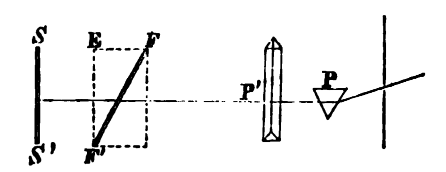
Bei hinreichender Länge des Spectrums kann das Auge sieben Farben unterscheiden, die in der Ordnung Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett aufeinander folgen. Das Roth befindet sich unten und das Violett oben, falls der brechende Winkel des Prisma nach unten gekehrt ist; dagegen erscheint die umgekehrte Farbenfolge, wenn der brechende Winkel nach oben gerichtet ist.

42. Die bezeichneten Strahlen des Sonnenlichtes, welche dem Auge verschiedenfarbig erscheinen, sind ungleich brechbar; am stärksten die sog. violetten Strahlen, weniger die blauen, noch weniger die grünen und gelben, und endlich am geringsten die rothen Strahlen. Diese ungleiche Brechbarkeit der verschiedenfarbig erscheinenden Lichtstrahlen ergibt sich auch, wenn man nacheinander zwischen die Oeffnung *o* und das Prisma farbige Gläser oder Flüssigkeiten bringt, die nur eine vorherrschende Farbe durchlassen. Stellt man z. B. zwischen die Oeffnung und das Prisma ein rothes Glas, so gehen durch das Prisma rothe Strahlen, die auf einem gegenüberstehenden weissen Schirm an einem bestimmten Orte ein rothes rundes Sonnenbild hervorbringen. Ersetzt man das rothe Glas durch ein blaues, so entsteht ein blaues Bild, das aber, wenn der brechende Winkel des Prisma nach unten gekehrt ist, bedeutend höher liegt als das rothe, was eben daher kommt, dass die sog. blauen Strahlen stärker als die rothen durch das Prisma gebrochen und von ihrer anfänglichen Richtung abgelenkt werden. Das Spectrum besteht sonach eigentlich aus einer Reihe verschiedenfarbiger Bilder, die zum Theil übereinanderfallen. Je kleiner die Oeffnung ist, durch welche das weisse Sonnenlicht auf das Prisma fällt, desto weiter treten die verschiedenen Bilder auseinander und desto länger erscheint auch das Spectrum. Rücken aber die einzelnen Bilder wenig auseinander (Fig. 58), so können alle Farben theilweise übereinander fallen, und da, wo dies geschieht, sehen wir weiss.

Fig. 58.

Die ungleiche Brechbarkeit der verschiedenen Farbenstrahlen, welche durch das Prisma aus dem Sonnenlichte ausgesondert werden, geht auch aus folgendem von Newton herrührenden Versuche hervor. Man lasse die aus dem horizontalen Prisma *P* austretenden Strahlen, welche in *SS'* ein Spectrum darstellen würden, in *P'* auf ein zweites vertikales Prisma fallen, dessen Axe mit der Verlängerung des Farbenbildes *SS'* parallel ist. Dann erhält man

Fig. 59.



anstatt des Farbenbildes *SS'*, welches nach der vertikalen Richtung verlängert war, ein nach geneigter Richtung verlängertes Farbenbild *FF'*, indem alle von *P* nach *SS'* hingehenden Strahlen durch das zweite Prisma eine seitliche Brechung und Ablenkung erfahren. Wären nun alle diese Strahlen in gleichem Grade brechbar, so würde etwa in *EF'* ein dem Spectrum *SS'* paralleles Farbenbild entstehen. Dies ist jedoch nicht der Fall, sondern die violetten Strahlen geben in *F* ein von *S* entfernteres Bild, und sind also stärker gebrochen als die rothen Strahlen, welche in *F'* ein von *S'* weniger entferntes Bild geben. Die zwischenliegenden Strahlen zeigen eine mittlere Brechbarkeit.

Zur Erzeugung eines reinen Spectrums ist die Erfüllung mehrerer Bedingungen erforderlich. Die Oeffnung muss sehr klein sein und der Schirm, auf dem sich das Spectrum darstellen soll, hinreichend weit von derselben abstehen. Operirt man mit einem Prisma, dessen brechende Fläche von beträchtlicher Grösse ist, so werden ein nahe der Kante und ein nahe der Basis auffallender Strahl, nach ihrer Zerstreuung (Dispersion), verschiedene Spectra auf einem Schirme darstellen, wo dann die Farben des einen die des anderen überdecken werden. Es ist zu bedenken, dass die Lichtstrahlen, welche von den verschiedenen Punkten eines leuchtenden Gegenstandes (hier der Sonne) ausgehen, nicht alle untereinander parallel sein können. Jeder Punkt sendet für sich ein Strahlenbündel aus, welches ein Spectrum erzeugen kann, und so ist das auf gewöhnliche Weise gebildete Spectrum aus unzählig

vielen anderen zusammengesetzt, die eben von den einzelnen Strahlenbündeln herrühren; daher dann in jedem Punkte des zusammengesetzten Spectrums Strahlen von ungleicher Brechbarkeit zusammenfallen. Damit dies nun möglichst vermieden werde, leitet man das Sonnenlicht mittelst eines drehbaren Spiegels (Heliostaten), der ausserhalb des verfinsterten Zimmers am Laden angebracht ist, durch eine schmale Spalte auf ein Prisma, das mit seiner brechenden Kante derselben parallel und in einer solchen Entfernung aufgestellt ist, dass die Spaltöffnung als eine leuchtende Linie angesehen werden kann, die nur Strahlen von geringer Divergenz auf das Prisma sendet. Auch lässt man wohl das Licht zweckmässig durch zwei hintereinander befindliche enge Spaltöffnungen gehen. Sodann ist noch erforderlich, dass das Prisma aus einer möglichst homogenen Glasmasse besteht, damit das hindurchgehende Licht möglichst regelmässig gebrochen werde.

43. Newton nahm die von ihm hervorgehobenen sieben Spectralfarben, welche aus dem weissen Lichte durch die Brechung in einem Prisma auseinander treten, als homogene Grundfarben an, da sie in einem zweiten Prisma wohl abermals gebrochen und abgelenkt, aber nicht in neue einfachere Farbestrahlen zerlegt werden können. Sei durch ein Prisma P (Fig. 57.) auf dem Schirme ww ein Spectrum mit allen seinen Farben erzeugt, und werde nun in diesem Schirme eine kleine Oeffnung gemacht, so dass durch dieselbe nur rothe Strahlen gehen können, dann stellt sich auf einem zweiten Schirme $w'w'$ ein rothes Bildchen dar. Lässt man aber die rothen Strahlen zuvor durch ein zweites Prisma P' dringen, so erfahren sie in diesem eine abermalige Brechung, jedoch keine Zerlegung in neue Farbestrahlen. Auf dem Schirme $w'w'$ wird sich immer nur ein einfarbiges (rothes Bild) zeigen. Dreht man daher das Prisma P so, dass eine Farbe nach der anderen auf die Oeffnung des Schirmes ww kommt, so werden nacheinander andersfarbige Bilder auf den zweiten Schirm $w'w'$ fallen. Diese Bilder rücken herauf oder herunter, je nachdem die Farbestrahlen, von denen sie herrühren, durch das zweite Prisma P' mehr oder minder stark gebrochen werden.

Aus den bisherigen Versuchen können wir den Schluss ziehen, dass Brechbarkeit und Farbenempfindung in einer gewissen nothwendigen Beziehung zu einander stehen, in der Art, dass Lichtstrahlen von gleicher Brechbarkeit dieselbe Lichtempfin-

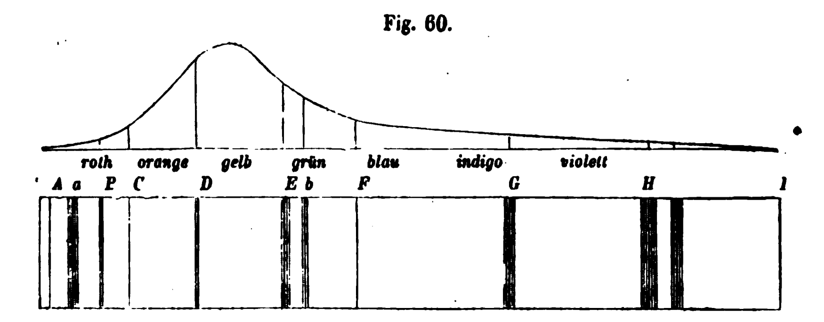
dung und Strahlen, die sich durch einen ungleichen Grad der Brechbarkeit von einander unterscheiden, auch verschiedene Farbenempfindungen veranlassen. Nun lässt sich der Grad der Brechbarkeit, der durch die Grösse des Brechungsexponenten gegeben ist, objectiv bestimmen. Demselben entspricht subjectiv eine gewisse Qualität des Lichtes, die man Farbe nennt, womit man streng genommen eben nur die Empfindung bezeichnen kann, welche Strahlen von einem gewissen Grade der Brechbarkeit in uns erregen. Zu unterscheiden aber von der Art des Eindruckes, der Qualität des Lichtes, ist die Quantität (Intensität) desselben. So können zwei Lichter, die Strahlen von gleicher Brechbarkeit und darum auch von gleicher Farbe aussenden, einen ungleich starken Eindruck auf unser Auge machen, so dass uns das eine heller (intensiver) als das andere erscheinen wird.

44. Was nun die Anzahl der ungleich brechbaren Strahlen im Sonnenlichte betrifft, so lässt sich darüber im Allgemeinen nicht entscheiden, also auch nicht über die Anzahl der verschiedenen Farbestrahlen, aus welchen das Sonnenlicht möglicher Weise zusammengesetzt ist. Enthielte das Sonnenlicht innerhalb gewisser Grenzen Strahlen von allen möglichen Graden der Brechbarkeit, so müsste sich auch das durch das Prisma erzeugte Spectrum als aus stetig aufeinander folgenden Lichtstreifen zusammengesetzt darstellen, was jedoch nicht der Fall ist, wie die von Fraunhofer zuerst wahrgenommenen dunklen Linien im Spectrum des Sonnenlichts bekunden. Diese Linien, welche bestimmt darauf hindeuten, dass im Sonnenlichte Strahlen von einem gewissen Grade der Brechbarkeit fehlen, lassen sich deutlich wahrnehmen, wenn man die Einrichtung trifft, dass das Sonnenlicht durch eine schmale, aber etwas hohe vertikale Spalte in ein dunkles Zimmer dringt, worin ein achromatisches Fernrohr in der Art aufgestellt ist, dass man durch dasselbe die Spalte deutlich sehen kann. Steht nun vor dem Objectiv des Fernrohres ein Prisma so, dass dessen brechende Kante (die Kante des brechenden Winkels) der Spalte parallel ist, und die hindurchgehenden Strahlen das Minimum der Ablenkung erleiden (S. 32), so sieht man im Spectrum, welches durch das Ocular des Fernrohres vergrössert erscheint, eine grosse Menge dunkler oder schwarzer Streifen, die auf der Längenrichtung des Farbenbildes senkrecht stehen, und

die man auch objectiv auf einem Schirme darstellen kann*), falls man hinter dem Prisma eine sog. achromatische Linse von grosser Brennweite anbringt.

Obschon nun diese Linien unregelmässig über das Spectrum vertheilt erscheinen, so haben sie doch eine feste Stellung zu einander. Der leichteren Orientirung wegen wählte Fraunhofer einige

Fig. 60.



leicht bemerkbare Streifen aus und bezeichnete sie vom rothen gegen das violette Ende des Spectrums hin mit den Buchstaben *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G* und *H*. So sind *A*, *B*, *C* dunkle, scharf begrenzte Linien im Roth, und zwar *B* eine Doppellinie; *a* ist eine Gruppe feiner Linien zwischen *A* und *B*, ferner *D* eine Doppellinie im Orange, *E* eine Gruppe feiner Linien im Uebergange von Gelb in Grün, *F* eine starke Linie im Grün, dem blauen Ende sehr nahe, *G* wieder eine Gruppe feiner Linien zwischen Indigo und Violett, und endlich *H* ein aus vielen Linien zusammengesetzter mit einer starken Mittellinie versehener Streifen, in dessen Nähe sich ein zweiter ähnlicher befindet. Zwischen diesen ausgewählten Streifen und Linien liegt noch eine Menge anderer feiner, schwarzer Linien. Fraunhofer zählte von *B* bis *H* etwa 574 Linien; ihre Anzahl nimmt aber zu mit der Vergrösserung des Fernrohres, so dass Brewster**) das Sonnenspectrum in mehr als 2000 unterscheidbare Theile zerlegen konnte, in welchen dunkle Linien zu erkennen waren. Die schwächeren verschwinden, wenn das Farbenbild an Grösse abnimmt. Uebrigens ist die Lage der Streifen unabhängig sowohl von dem brechenden Winkel als auch von

*) Vgl. Poggend. Ann. Bd. LXIX. S. 93. Bd. LXX. S. 115.

**) Edinb. Transact. V. XII, p. 525. Poggend. Ann. Bd. XXXVIII. S. 58.

der Materie des Prisma, nicht aber von der Beschaffenheit der Lichtquelle.

Diese dunklen Streifen erhielten, wegen ihrer festen Stellung im Spectrum, eine besondere Wichtigkeit für die Ermittelung der Brechungsverhältnisse verschiedener starrer und tropfbarflüssiger Körper. Das frühere Verfahren war ungenau; zwar konnte man, wenn die Richtung des einfallenden Strahles gegeben war, aus der Lage jeder einzelnen Farbe im Spectrum die Richtung des gebrochenen Strahles in der betreffenden Substanz und daher auch das Brechungsverhältniss bezüglich gewisser Farbestrahlen ermitteln, allein wegen der Unbestimmtheit der Grenze jeder einzelnen Spectralfarbe blieb hierbei immer einige Unsicherheit zurück. Anstatt nun die Brechungsexponenten für die sog. rothen, gelben Strahlen u. s. w. zu bestimmen, ermittelte Fraunhofer*) die Brechungsexponenten für die Strahlen, welche in Bezug auf ihre Ordnung im Spectrum den Streifen *A*, *B*, *C*, *D*, ... entsprechen würden.

45. Das Spectrum des Sonnenlichtes ist veränderlich mit dem Stande der Sonne und mit dem Zustande der Atmosphäre. Steht die Sonne niedriger, so ist die Anzahl der dunklen Linien meist grösser als sonst, und beim Auf- und Untergange der Sonne verschwindet ein sehr grosser Theil der violetten und blauen Strahlen, während die dunklen Linien in grösserer Zahl auftreten. Diese Linien entstehen also wahrscheinlich durch eine Einwirkung der Atmosphäre, insofern Strahlen von einem gewissen Grade der Brechbarkeit in derselben ausgelöscht oder von ihr absorbirt werden, was sich dann im Spectrum durch dunkle Lücken zu erkennen gibt. Hierauf weisen auch einige Wahrnehmungen **) hin, welche zuerst von Brewster und dann auch von Miller und Daniell gemacht wurden, dass nämlich Licht, welches durch gewisse farbige Gase gegangen ist, ein von unzählig dunklen Linien durchschnittenes Spectrum zeigt. Lässt man Sonnenlicht durch ein Gefäss mit parallelen Glaswänden gehen, worin durch allmälige Erwärmung von Jod sich Dämpfe des letzteren bilden, so sieht man im Spectrum des hindurchgegangenen Lichtes, und zwar zunächst in dem blauen Theile blasse, schwarze Streifen in ziemlich gleichem Abstande von

*) Vgl. Memoiren der Münchner Academie, 1814, Bd. V., auch Dutirou in Annales de Chimie et Physique, 3me série, T. XXVIII.

**) Edinb. Transact. Vol. XII. p 505. Poggend. Ann. Bd. XXVII. S. 386, Bd. XXXII. S. 128, XXXIII. S. 233, XXXVII. S. 315, XXXVIII. S. 52, LXIX.

einander. So wie nun die Dichte des Joddampfes zunimmt, treten auch in den übrigen Theilen des Spectrums dunkle Streifen auf, und man sieht sie dann im Roth dichter als im Violett nebeneinander stehen. Brom- und unterchlorsaures Gas bieten ähnliche Linien dar. — Uebergiesst man Kupfer mit Salpetersäure, so entwickeln sich rothe Dämpfe von Untersalpetersäure, und bei diesen entdeckte Brewster in dem hindurchgegangenen Lichte eine grosse Menge von dunklen Streifen, die jedoch in ungleichen Abständen auf einander folgten. Zwischen dem Spectrum des Kerzenlichtes, nachdem dieses durch salpetrigsaure Dämpfe gegangen ist, und dem gewöhnlichen Sonnenlichte fand Brewster viel Uebereinstimmendes, da beide Spectra die dunklen Linien in ähnlicher Anordnung zeigten. Die Anzahl dieser dunklen Linien nimmt mit der Länge des Weges zu, den die Strahlen in dem gasförmigen Medium zurückzulegen haben, so wie auch mit der Intensität der Farben. — Im Gegensatze zu den Gasen oder Dämpfen scheinen starre und tropfbarflüssige Körper gar nicht im Stande zu sein, den im Sonnenspectrum bereits vorhandenen dunklen Streifen noch neue hinzufügen.*)

Die Spectra vom Lichte der Venus und des Mars enthalten dieselben fixen Linien, wie das Sonnenspectrum und fast genau an demselben Orte. Die Fixsterne geben ein Spectrum zwar auch mit fixen Linien, aber die Stellen derselben kommen nicht allenthalben mit denen des Sonnenspectrums überein. Das Licht des Sirius zeigt namentlich drei sehr auffallende dunkele Streifen, den einen im Grün und zwei im Blau. Im Spectrum des gewöhnlichen Flammenlichtes sah man zwischen Roth und Gelb einen hellen Streifen, und einen anderen ähnlichen, aber weniger scharf begrenzten im Grün.

Eine genauere Untersuchung des Spectrums, welches die von einer Flamme ausgehenden Lichtstrahlen mittelst eines Prisma gewähren, ist gewiss für die richtige Erkenntniss der Beschaffenheit, insbesondere der optischen Natur dieser Flamme von Bedeutung. Die meisten Lichtquellen zeigen nun zwar ein aus mehreren Farbenstreifen bestehendes Spectrum, allein es gibt doch auch solche, welche fast nur homogenes Licht verbreiten, wie dies z. B. bei der Flamme von sehr verdünntem Weingeist der Fall ist,

*) Vgl. Rudberg: Poggend. Ann. Bd. XXXV.

namentlich wenn der Docht der Lampe mit Kochsalz eingerieben wurde. Die ausgesendeten Strahlen erscheinen dann im Spectrum, bis auf den unteren Theil, vollkommen gelb. Auch der Schwefel verbreitet, wenn er im lebhaften Verbrennen begriffen ist, grösstentheils homogenes gelbes Licht, während sich bei einer minder raschen Verbrennung blaue und grüne Streifen im Spectrum zeigen. Eine bemerkenswerthe rothe Linie erscheint im Farbenspectrum der Schwefelflamme, wenn der Schwefel mit Salpeter gemischt verbrannt wird. Diese Linie ist durch einen dunklen Zwischenraum von dem eigentlichen rothen Theile des Spectrums getrennt, und ihr Licht ist weniger brechbar als die rothen Strahlen des Sonnenspectrums. Man schreibt dieselbe der Anwesenheit des Kali zu und hält sie überhaupt für eine Eigenthümlichkeit der Kalisalze. Das Farbenbild des salpetersauren Natrons, welches sich mit mehreren ungleichen Unterbrechungen darstellt, ist ausgezeichnet durch eine isolirte hellglänzende, dunkelblaue Linie. Die Spectra der Flammen verschiedener Kohlenwasserstoffverbindungen sind aber durch mehrere helle Linien charakterisirt, die nach Swan*) nicht den dunkeln Linien, sondern den hellen Räumen des Sonnenspectrums entsprechen sollen.

46. Die einzelnen Farben des prismatischen Sonnenbildes unterscheiden sich sowohl durch die Grösse des Raumes, den sie einnehmen, als auch durch ihre Lichtstärke. In Hinsicht auf die Ausdehnung der einzelnen Farben im Sonnenspectrum gab Newton die Bestimmung, dass, wenn man das ganze Bild in 360 Theile, nach Analogie der Kreiseintheilung, zerlege, Violett 80, Indigo 40, Blau 60, Grün 60, Gelb 48, Orange 27, Roth 45 solcher Theile einnehme.

Herschel**) stellte Beobachtungen über die grössere oder geringere Lichtstärke der einzelnen Spectralfarben an, dergestalt, dass er verschiedene Gegenstände durch ein Mikroskop betrachtete, während dieselben bald mit der einen, bald mit der anderen prismatischen Farbe beleuchtet waren. So fand sich, dass die Gegenstände am stärksten durch das gelbe Licht erleuchtet wurden, besonders wenn man sie in die Gegend des Farbenbildes brachte,

---

*) Edinb. Transact. XXI. P. III. p. 411.

**) Unters. über die Natur der Sonnenstrahlen, übers. von Harding. Celle 1801. S. 13.

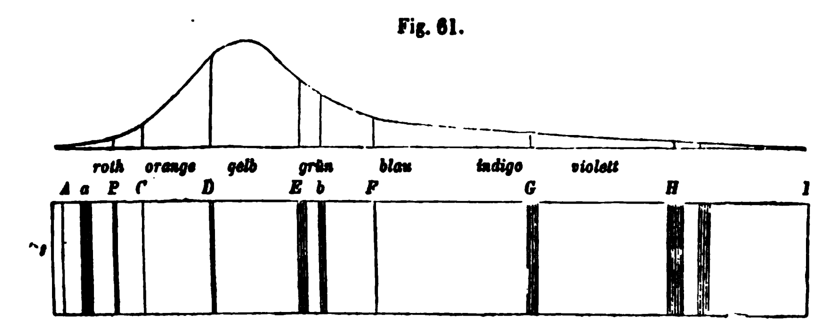
wo das vollkommene Gelb in Grün überzugehen anfängt. Wenn man sich aber von dieser Gegend nach der einen oder anderen Seite hin entfernte, so wurde die Erleuchtung schwächer: im Orange schwächer als im Gelb, im Roth schwächer als im Orange, und im Grün war sie nicht so stark als in dem erwähnten Uebergange von Gelb in Grün. Im blauen Lichte ward die Erleuchtung immer schwächer, je mehr man sich von der Mitte des Farbenbildes entfernte, im Violett aber schwächer als in irgend einem der übrigen Farbestrahlen. Noch genauere Beobachtungen über die Lichtstärke der verschiedenen Spectralfarben stellte Fraunhofer an, deren Resultate jedoch mit denen von Herschel im Wesentlichen übereinstimmen.

Fraunhofer befestigte in einem Fernrohre an der Stelle, wo das von dem Objectiv erzeugte Bild hinfällt, einen kleinen unter 45° gegen die Axe des Rohres geneigten metallenen Planspiegel, dessen vertikaler Rand scharf begrenzt ist und das Gesichtsfeld durchschneidet. Diesen Rand sah man durch das Ocular sehr scharf. Auf den Spiegel fielen nun durch eine kleine runde Oeffnung die Lichtstrahlen einer kleinen Flamme, die in einer seitlichen Röhre angebracht war und von einem communicirenden Oelgefässe genährt wurde. Nun sah man in der einen Hälfte des Gesichtsfeldes im Fernrohre den von der Flamme beleuchteten Spiegel und in der anderen Hälfte desselben eine von den Farben des prismatischen Sonnenbildes. So liess sich die Erleuchtung, welche die verschiedenen Farben des Spectrums gewähren, vergleichen mit der Erleuchtung, die das zugleich gesehene Licht der Flamme gab, und auch beobachten, bei welchem Abstande der Flamme vom Spiegel beide Erleuchtungen einander gleichkamen. Die gleiche Intensität der letzteren war insbesondere daran zu erkennen, dass die sonst scharf sichtbare Grenze des Spiegels dann mit der geringsten Deutlichkeit hervortrat, wenn die Intensität des Farbestrahles mit der des Lichtes, welches der Spiegel reflectirte, gleich war. Da nun die Erleuchtungen durch die Flamme den Quadraten ihrer Entfernung vom Spiegel umgekehrt proportional sind, so liess sich aus den ungleichen Entfernungen, in welche die Flamme bei den verschiedenen Farben gestellt werden musste, um mit ihnen gleiche Erleuchtung zu geben, die erleuchtende Kraft dieser Farben näherungsweise schätzen. Diese Versuche wurden noch in der Weise variirt, dass das Licht der Lampe durch ein

mattgeschliffenes Glas auf den Spiegel fiel, während man durch die andere Hälfte des Fernrohres eine von den betreffenden Farbestrahlen beleuchtete weisse Fläche betrachtete.

Fraunhofer fand nun, dass der hellste Ort des prismatischen Farbenbildes etwa um $^1/_4$ oder $^1/_3$ der ganzen Länge desselben vom rothen Endpunkte entfernt liegt. Die Figur giebt eine gra-

Fig. 61.



phische Darstellung der Intensitäten des Lichtes an den verschiedenen Stellen des Spectrums, indem dieselben durch die Höhen (Ordinaten) der Curve, welche über der Figur verzeichnet ist, an jeder einzelnen Stelle vorgestellt werden. Bei *A* ist das rothe, bei *I* das violette Ende des Farbenbildes, jedoch ohne scharfe Grenze. — Folgende Zahlen geben nach Fraunhofer's Messungen die Verhältnisse der Intensitäten an, das Maximum = 1,00 gesetzt.

Bei *B* = 0,032
„ *C* = 0,094
„ *D* = 0,64
Maxim. = 1,00
bei *E* = 0,48
„ *F* = 0,17
„ *G* = 0,031
„ *H* = 0,006

Hiernach ist das gesammte Licht in den einzelnen Theilen des Spectrums etwa so vertheilt, dass auf die einzelnen Räume folgende verhältnissmässige Quantitäten Licht kommen.

Das im Raume *DE* vorhandene Licht = 1 gesetzt.	oder	Die ganze Summe des Lichtes im Farbenspectrum = 1 gesetzt.
BC = 0,021		= 0,0113
CD = 0,299		= 0,1599

Das im Raume *DE* vorhandene Licht = 1 gesetzt.	oder	Die ganze Summe des Lichtes im Farbenspectrum = 1 gesetzt.
DE = 1,000		= 0,5354
EF = 0,328		= 0,1757
FG = 0,185		= 0,0990
GH = 0,035		= 0,0187

47. Es ist bekannt, dass die Sonne mit dem Lichte zugleich Wärme spendet. Was nun die Vertheilung der letzteren im Sonnenspectrum betrifft, so lehrten Versuche, dass der Ort der grössten Wärme noch etwas jenseits der rothen Strahlen liegt. Die Sonne sendet also Strahlen von sehr verschiedener Brechbarkeit aus, und darunter auch solche, deren Brechbarkeit noch geringer als die der rothen Strahlen ist. Strahlen von so geringer Brechbarkeit wirken nicht mehr leuchtend, sondern bilden eine dunkele Wärmefluth. Aber auch jenseits des Violetts giebt es im Sonnenspectrum noch Strahlen, die noch brechbarer als die violetten Strahlen sein müssen. Diese Strahlen jenseits des Violetts (die sogenannten übervioletten Strahlen) machten sich zunächst durch ihre chemische Wirksamkeit bemerklich, weshalb sie denn auch nicht selten unter dem Namen der chemischen Strahlen erwähnt werden. Man glaubte von ihnen bis auf die neueste Zeit, dass sie gleich den dunkeln Wärmestrahlen jenseits des Roths unsichtbar seien, entweder dadurch, dass sie wie jene von den brechenden Medien des Auges absorbirt würden, oder weil sie überhaupt nicht im Stande wären, die Nervenhaut des Auges zu afficiren. Doch haben neue von Helmholtz *) angestellte Versuche dargethan, dass alle Strahlen des Sonnenlichtes, deren Brechbarkeit grösser ist als die der äussersten rothen Strahlen, unter geeigneten Umständen direct wahrgenommen werden können, obwohl wir allerdings von den übervioletten Strahlen nichts wahrnehmen, wenn ein Sonnenspectrum auf gewöhnlichem weissen Papier entworfen wird, weil sie dann von anderem diffusen Lichte überstrahlt werden. Durch sorgfältige Isolirung können sie aber zur Wahrnehmung gelangen, zumal wenn man anstatt gewöhnlicher Glasprismen, die sie merklich absorbiren, Quarzprismen benutzt, welche denselben in grösserer Menge den Durchgang gestatten.

48. Bevor die Zerlegung des weissen Lichtes durch Newton bekannt war, betrachtete man fast allgemein Roth, Gelb und Blau

*) Poggend. Ann. Bd. XCIV. S. 205.

als Grundfarben, aus deren Mischung die übrigen Farben hervorgehen sollten. Dabei stützte man sich vorzugsweise auf Versuche, die mit verschiedenen Farbestoffen vorgenommen wurden, wo man dann im Allgemeinen aus Roth und Blau Violett, aus Gelb und Blau Grün, und aus Gelb und Roth Orange erhielt. Später behauptete Mayer auch die Zusammensetzung des Sonnenlichtes aus diesen drei Farben, eine Ansicht, die in eigenthümlicher Weise neuerdings an dem verdienstvollen englischen Optiker Sir David Brewster*) einen lebhaften Vertheidiger gefunden hat. Nach ihm besteht das Sonnenspectrum aus drei gleich langen Spectris, einem rothen, einem gelben und einem blauen, welche an denselben Punkten anfangen und endigen. Alle Farben des Spectrums sind demzufolge zusammengesetzt aus Roth, Gelb und Blau in verschiedenen Verhältnissen. Auch ist eine gewisse Menge weissen Lichtes, die unzerlegbar durch das Prisma ist, weil alle dazu gehörigen rothen, gelben und blauen Strahlen gleiche Brechbarkeit haben, in jedem Punkte des Spectrums vorhanden, und kann an einigen derselben isolirt dargestellt werden. Das letztere geschah dadurch, dass Brewster das gemischte Licht durch durchsichtige Stoffe von verschiedener Farbe gehen liess, also durch Körper, welche gewisse Farbestrahlen nicht hindurchlassen, wozu er theils farbige Gläser, theils getrockneten durchsichtigen Leim, theils Oele oder Lösungen gefärbter Stoffe verwandte. Auf solche Weise kam nach Brewster das weisse Licht von seiner farbigen Beimischung befreit zum Vorschein, indem durch Absorption der Ueberschuss einer jeden Farbe, die in grösserer als zur Zusammensetzung des weissen Lichtes nöthigen Menge da war, abgeschieden wurde. Jede der bezeichneten Lichtarten soll Strahlen von allen Abstufungen der Brechbarkeit enthalten, wie sie im prismatischen Spectrum vorkommen, nur dass das rothe Licht mehr Strahlen von geringerer Brechbarkeit, das gelbe mehr von mittlerer und das blaue mehr von grösserer in sich begreift. Und jedes der drei einfarbigen übereinander liegenden Spectra hat die Eigenschaft, dass die Intensität des Lichtes von dem einen Ende bis zu einem gewissen Punkte wächst, wo sie ihren höchsten Grad erreicht, und dann bis zu dem anderen Ende wieder abnimmt. Der Punkt der höch-

*) Edinb. Transact. of the Roy. Soc. Vol. IX. P. II. p. 433. Vol. XII. P. I. p. 123. Philos. Magaz. Vol. XXX. p. 153. Ibid. Vol. XXX. p. 461. Vol. XXXII. p. 489.

sten Intensität fällt aber bei diesen einzelnen Grundfarben auf verschiedene Stellen und die Zunahme vom Ende bis zu diesem Punkte ist nicht gleichförmig oder für jede Farbe gleichartig. Wenn also die rothen, gelben und blauen Strahlen drei zusammenfallende Spectra von gleicher Länge geben, so muss jede von diesen Farben in allen Theilen des Spectrums vorkommen, und dies hat eben Brewster nachzuweisen gesucht. So sagt derselbe z. B. in Bezug auf die rothen Strahlen: Aus dem blossen Anblick des Spectrums ist ersichtlich, dass in dem rothen, orangefarbenen und violetten Felde desselben rothes Licht vorhanden ist. Da nun diese drei Felder, nach Fraunhofer's Messungen, 190 Theile nehmen, wenn das ganze Spectrum deren 360 misst, so finden sich rothe Strahlen in mehr als der Hälfte des ganzen Spectrums. Untersucht man aber das blaue und indigofarbene Feld durch gewisse gelbe Flüssigkeiten, z. B. durch Olivenöl, so bekommen sie eine deutliche violette Farbe, woraus folge, dass diese Flüssigkeiten gewisse Strahlen, die das Roth neutralisirten oder unsichtbar machten, verschluckt hätten. Rothes Licht sei also in dem blauen und indigofarbenen Felde vorhanden, und da weisses Licht, welches doch nothwendig Roth enthalte, sowohl aus dem grünen wie aus dem gelben Felde abgeschieden werden könne, so folge, dass in allen sieben Farbenfeldern, in welche sich das Spectrum theilen lässt, rothes Licht anwesend sei. In ähnlicher Weise suchte man durch Anwendung verschiedener absorbirender Mittel die Gegenwart der gelben und blauen Strahlen in allen Feldern des Spectrums nachzuweisen. Nur in Bezug auf das gelbe Licht macht Brewster die Bemerkung, dass er dasselbe im violetten Felde nicht habe finden können, was jedoch leicht erklärlich sei, wenn man bedenke, wie schwach die violetten Strahlen seien und wie leicht sie durch Medien von fast allen Farben absorbirt würden.

Wäre nun diese Ansicht Brewster's über die Zusammensetzung des Sonnenlichtes richtig, so könnte jene enge Beziehung zwischen der Farbe und Brechbarkeit der Lichtstrahlen (S. 78 f.), wonach jede bestimmte homogene Farbe durch Strahlen von einem bestimmten Grade der Brechbarkeit bedingt ist, nicht bestehen. Seit Newton nahm man an, dass homogenes Licht, nämlich solches, welches aus Strahlen von derselben Brechbarkeit besteht, bei seinem Durchgange durch verschiedene Medien keine Veränderung seiner Qualität, d. h. seiner Brechbarkeit (und Farbe) erleide, wie

es auch sonst bezüglich seiner Intensität verändert werden möge, während nach Brewster's Ansicht verschiedene Farbestrahlen von gleicher Brechbarkeit existiren und auch eine Qualitätsänderung homogenen Lichtes bei seinem Durchgange durch farbige Medien behauptet wird. Einige Bedenken, welche Airy *), Draper **) und Melloni ***) gegen das experimentale Verfahren Brewster's hervorhoben, wurden von letzterem ****) mit Erfolg zurückgewiesen. Dagegen hat Helmholtz †) mehrere Gründe aufgestellt, welche eine derartige Deutung der Brewster'schen Versuche zulassen, dass dadurch die scheinbaren Widersprüche gegen die Ansicht einer festen (constanten) Beziehung zwischen Qualität und Brechbarkeit der Lichtstrahlen verschwinden. So erklärt sich eines der auffallendsten von Brewster's Resultaten, nämlich die angebliche Isolation weissen Lichtes im Gelb des Spectrums durch Glas, welches mit Smalte blau gefärbt ist, aus einer Vermischung des regelmässig gebrochenen Lichtes mit solchem, welches theils ausserhalb, theils innerhalb des Auges unregelmässig zerstreut ist. Eine zweite Möglichkeit der Täuschung lag ferner, nach Helmholtz, in den physiologischen Erscheinungen des Contrastes, welche sehr leicht die Beurtheilung der Farben beeinträchtigen, besonders wenn wir ein schwach erleuchtetes Feld neben einem sehr viel helleren betrachten. Und drittens kommt bei einigen Versuchen Brewster's noch die physiologische Thatsache in Betracht, dass dasselbe homogene Licht bei verschiedener Intensität nicht ganz gleiche Farbeneindrücke hervorruft. Bei blendender Helligkeit scheinen vielmehr alle Farben weiss zu werden.

Jedenfalls geben die Versuche Brewster's keine zureichende Veranlassung, die bisher angenommene innige Beziehung zwischen Farbe und Brechbarkeit der Lichtstrahlen fallen zu lassen. Wir können und müssen vielmehr noch immer behaupten, dass Strahlen von einem bestimmten Grade der Brechbarkeit auch stets ein und dieselbe bestimmte Farbe veranlassen, vorausgesetzt, dass die

---

*) Philos. Magaz. Ser. III. Vol. XXX. p. 73. Poggend. Ann. Bd. LXXI. S. 393.

**) Philos. Mag. Vol. XXX. p. 345.

***) Philos. Mag. Vol. XXXII. p. 262. Poggend. Ann. Bd. LXXV. S. 62.

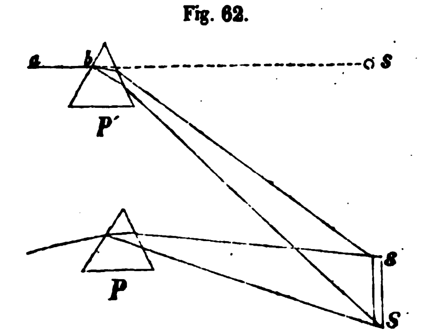
****) Philos. Mag. Ser. III. Vol. XXX. p. 153. Vol. XXXII. p. 489. Poggend. Ann. Bd. LXXI. S. 397. LXXV. S. 81.

†) Vgl. Poggend. Ann. Bd. LXXXVI. S. 501; — s. auch Bernard in Ann. de Chim. et Phys. XXXV. p. 385, und Moigno, Cosmos II. p. 491.

Intensität dieser Strahlen eine gewisse Grenze nicht überschreitet und der Zustand des Auges im Moment der Lichteinwirkung vom gewöhnlichen (normalen) Zustande nicht abweicht.*)

49. Ist das weisse Sonnenlicht durch ein Prisma in verschiedene Farbestrahlen zerlegt, so kann man dasselbe aus den letzteren wieder zusammensetzen. Lässt man z. B. die durch das Prisma gesonderten Farbestrahlen auf eine hinreichend grosse Convexlinse fallen, so vereinigt diese alle auffallenden Strahlen vor sich in einem Punkte. Bringt man nun ein weisses Papierblatt nahe vor die Linse, so erscheinen auf demselben erst noch die verschiedenen Farben, entfernt man es aber allmälig, so zeigt sich endlich im Vereinigungspunkte aller auf die Linse fallenden Strahlen ein helles weisses Sonnenbild. Entfernt man jedoch das Blatt noch weiter über diesen Punkt hinaus, so divergiren die Strahlen wieder und auf dem Blatte erscheinen von Neuem die verschiedenen Farben. Auch kann man nach Newton**) in folgender Weise die Zusammensetzung des weissen Lichtes aus den verschiedenen prismatischen Farben bewerkstelligen. Ein Prisma *P*, auf welches ein Sonnenstrahl fällt, bringt auf einer weissen Wand ein Farbenbild *SS* hervor. Nun stellt man ein zweites Prisma *P'* so auf, dass

Fig. 62.



ein Sonnenstrahl *ab*, wenn er auf dasselbe fallen könnte, ein Spectrum an derselben Stelle wie das erste hervorbrächte; dann

*) Ueber Goethe's Ansicht von den prismatischen Farben müssen wir hier auf dessen Farbenlehre verweisen, die neuerdings an Grevell (Die Göthe'sche Farbenlehre etc. Berlin 1858.) einen Vertheidiger gefunden hat. — Vgl. auch Dove, Darstellung der Farbenlehre und optische Studien, Berlin 1853. S. 15, 143.

**) Optice (third edit. 1721), Book I., Part. II., Prop. V. Exper. 11. — Poggend. Ann. Bd. LVIII, S. 358 u. 518.

werden die von den verschiedenen Stellen des Farbenbildes *SS* ausgehenden und auf das Prisma *P'* fallenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch das letztere sich zu dem Strahle *ab* vereinigen, so dass das Auge bei *s* in der Richtung *as* ein rundes weisses Bild des Spectrums wahrnimmt. Einen ähnlichen noch einfacheren Versuch beschreibt Goethe *). Wenn nämlich ein horizontal gestelltes Prisma, welches ein Spectrum auf einer weissen Wand darstellt, lang genug ist, so dass der Beobachter zugleich hindurchsehen kann, so sieht man das durch die Brechung im Prisma heraufgerückte Bild wieder heruntergerückt, und zwar als farblosen oder weissen Kreis an der Stelle, wo das Sonnenbild ohne Brechung erschienen wäre.

50. Wie man nun alle Farben des Sonnenspectrums durch eine sie aufsammelnde Linse in einen weissen leuchtenden Punkt vereinigen kann, so lassen sich auch zwei oder mehrere besondere Spectralfarben wieder zusammenbringen, wo man dann eine neue Farbe erhält, die der vorgenommenen Mischung entspricht. Um solche Mischfarben zu erhalten, liess Newton durch eine kleine Oeffnung ein dünnes Bündel Sonnenlicht in ein dunkles Zimmer fallen, stellte ihm unfern der Oeffnung ein Prisma horizontal entgegen und fing das Spectrum mittelst einer kleinen Tafel auf, in welcher über einander verschiedene Schieber angebracht waren, vermittelst deren man durch die Tafel gehende Spalten in verschiedener Höhe beliebig öffnen und schliessen konnte. Oeffnete man nun z. B. zwei Spalten, da wo zwei bestimmte Farben des Spectrums auf der Tafel erschienen, so gingen diese Farbestrahlen durch die Tafel hindurch. Die durchgelassenen Strahlen fing man aber mittelst einer Linse auf, welche um ihre doppelte Brennweite vom Prisma entfernt war; dann erschien auf einer weissen Tafel, die in derselben Entfernung von der Linse aufgestellt war, in welcher diese vom Prisma abstand, die aus den durchgelassenen Farbestrahlen entstehende Mischfarbe. Rückte man aber die weisse Tafel aus dem angegebenen Punkte heraus näher oder ferner der Linse, so erschienen die Farben wieder getrennt. Da nämlich die Strahlen sich im Vereinigungspunkte durchkreuzen, so müssen die Farben, wenn die Tafel weiter als dieser Punkt von der Linse entfernt steht, in umgekehrter Ordnung auf

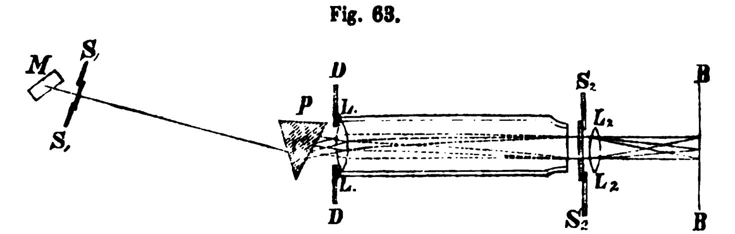
*) Zur Farbenlehre, I. §. 351—354.

ihr erscheinen, als wenn sie zwischen der Linse und dem Vereinigungspunkte steht.

Neuerdings hat auch Helmholtz*) Untersuchungen angestellt über die Mischfarben, welche durch das Zusammenfallen verschiedener prismatischer Farben erzeugt werden. Derselbe liess Sonnenlicht durch zwei schmale Spalten eindringen, die in einem schwarzen Schirme befindlich und unter einem Winkel von 90° gegen einander geneigt waren, während sie mit dem Horizont Winkel von 45° machten. Ganz nahe vor dem Objectivglas eines Fernrohres war ein gutes Flintglasprisma aufgestellt, so dass seine brechende Kante vertikal stand. Auf diese Weise erhielt man im Gesichtsfelde des Fernrohres zwei Spectra, die einander theilweise deckten, dergestalt, dass jeder Farbenstreifen des einen Spectrums einen jeden des anderen unter einem rechten Winkel durchschnitt. Im Durchschnittspunkte erschien dann die entsprechende Mischfarbe. Das Auge war in einer angemessenen Entfernung vom Ocular des Fernrohres zu halten, damit es jede homogen gefärbte Stelle unbeirrt durch den Eindruck der benachbarten wahrnehmen konnte.

51. Später wandte Helmholtz**) ein anderes, genaueres Verfahren an, das Aehnlichkeit mit einer Methode hat, die von Foucault beschrieben wurde.***) Ein Bündel Sonnenlicht wird von dem Spiegel eines Heliostaten *M* in ein verfinstertes Zimmer reflectirt und fällt hier zunächst auf einen schwarzen Schirm S_1S_1 mit einer

Fig. 63.



Spalte. Die durch die letztere gegangenen Strahlen fallen in der Entfernung von etwa 10 Fuss auf ein Prisma *P*, welches am anderen Ende eines Fernrohres angebracht ist. Zwischen Prisma

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXVII. S. 45.

**) Poggend. Ann. Bd. XCIV. S. 1.

***) Moigno, Cosmos 1853, T. II. p. 232 — Poggend. Ann. Bd. LXXXVIII. S. 385.

und Objectivglas befindet sich ein rechteckig ausgeschnittenes Diaphragma *DD*, um die neben dem Prisma vorbeigehenden Strahlen zurückzuhalten. Das Ocularglas des Fernrohres ist hinweggenommen, und das von der Objectivlinse *LL*, nahe ihrem Brennpunkte entworfene und durch das Prisma in ein Spectrum verwandelte Bild des ersten Spaltes wird hier auf einem zweiten Schirme S_2S_2 aufgefangen, der selbst wieder mit zwei Spalten versehen ist. Die besondere Construction dieses Schirmes findet man an dem citirten Orte näher beschrieben.*) Derselbe ist so eingerichtet, dass man in ihm zwei Spalten an beliebiger Stelle hervorbringen kann, um nach Belieben bald diesem, bald jenem Paar einfacher Spectralfarben den Durchgang zu gestatten. — Das durch die Spalten getretene Licht trifft nun auf der Rückseite des Schirmes eine zweite achromatische Linse L_2L_2, dessen Brennweite kürzer ist als die des Objectivglases im Fernrohre. Diese Linse entwirft vermittelst der beiden durch den Schirm gegangenen Antheile einfachen farbigen Lichtes auf einem weissen Papierblatte *BB* ein Bild von der Oeffnung des Diaphragma *DD*. Dieses Bild erscheint als ein gleichmässig gefärbtes Rechteck, und zwar, wenn nur durch eine Spalte Licht geht, in der Farbe dieses einfachen Lichtes, falls aber durch beide, in der aus den beiden einfachen zusammengesetzten Farbe. Indess sind noch mehrere Vorsichtsmassregeln zu beachten, um das Bild scharf und gleichmässig gefärbt zu erhalten.**) So muss die Entfernung des ersten Spaltes von der ersten Linse möglichst gross genommen werden, und auch die Linse und das Prisma frei von allen Unreinigkeiten sein.

Durch die Einrichtung des Schirmes S_2S_2 ist man nun in den Stand gesetzt, die beiden Spaltöffnungen so herzustellen, dass man nach einander irgend ein Paar der verschiedenen homogenen Farbestrahlen, in welche das weisse Sonnenlicht durch das Prisma gesondert ist, auf dem Schirme *BB* zur Vereinigung bringen kann. Und hierdurch erfährt man dann auch die Mischfarben, welche irgend zwei homogene Spectralfarben hervorbringen können.

52. Sondert man von den sämmtlichen Spectralfarben eine bestimmte aus, so muss aus der Vereinigung der übrigen eine gewisse Farbe resultiren, welche mit jener anderen verbunden weis-

*) S. 3.

**) A. a. O. S. 4 f.

ses Licht giebt. Man nennt nun überhaupt zwei Farben, die einander zu Weiss ergänzen, Complementär- oder Ergänzungsfarben. Helmholtz fand aber mittelst der obigen in ihren Hauptpunkten beschriebenen Methode, dass auch unter den einfachen Spectralfarben eine Reihe complementärer Farbenpaare existirt. In der nachstehenden Tabelle sind die einander gegenüberstehenden Spectralfarben zu einander complementär, so dass sie also mit einander vereinigt den Eindruck des Weiss geben.

Violett	Grünliches Gelb
Indigblau	Gelb
Cyanblau	Goldgelb
Grünliches Blau	Roth.

Das Grün ist hiernach die einzige einfache Spectralfarbe, welche keine einfache Complementärfarbe besitzt. Um Weiss zu geben, muss es mit zwei anderen Farben, nämlich mit Roth und Violett, d. h. mit Purpur, gemischt werden.

Violett (von viola, Veilchen) bezeichnet hier die Uebergangsstufe des Blau in Roth, in welcher ersteres überwiegt. Helmholtz unterscheidet dasselbe vom Purpur, mit dem es zuweilen verwechselt wird. Unter Purpur versteht man die röthlichen Töne, nämlich die Uebergangsfarben zwischen dem Violett und dem Roth. Der Name Indigblau bezieht sich, wie gewöhnlich, auf das brechbarere Blau im Spectrum, der Name Cyanblau auf das weniger brechbare Blau, dem die Farbe des Eisencyanürcyanids entspricht. Goldgelb bezeichnet die Gegend der Linie *D* im Spectrum, den Uebergangston zwischen Gelb und Roth, worin ersteres vorwiegt. Bei vorwiegendem Roth giebt es Orange, wie es zwischen den Linien *C* und *D* vorkommt. Der Name Roth bezieht sich auf den Farbenton des weniger brechbaren Endes des Spectrums, nicht auf das Purpur, die Mischung von Roth und Blau. Dem einfachen äussersten Roth entspricht der Farbenton des Zinnobers.

Die Vertheilung der complementären Farben im Spectrum bietet einiges Auffallende dar. Während nämlich das äusserste Roth und Goldgelb einen beträchtlichen Raum zwischen sich lassen, liegen ihre Complemente, grünliches Blau und Cyanblau, ganz dicht neben einander, so dass also die Grade ihrer Brechbarkeit nicht sehr von einander abweichen.

53. Helmholtz*) stellte auch einige Versuche an, um die Intensitätsverhältnisse zu ermitteln, welche complementäre einfache Farben haben müssen, damit sie gemischt Weiss geben. Zu diesem Behufe wurde ein dünnes Stäbchen vor das Feld gehalten, welches von dem gemischten Lichte beleuchtet ward. Das Stäbchen warf dann zwei farbige Schatten, in denen die beiden einfachen Farben sich einzeln und in der ihnen zukommenden Lichtstärke darstellten. — Um aber das Verhältniss der Helligkeit complementärer Mengen von verschiedenen einfachen Farben annäherungsweise in Zahlen auszudrücken, setzte Helmholtz erst Weiss aus zwei Farben zusammen, und mass mikroskopisch die Breite des Spaltes, durch welche die hellere der beiden Farben drang. Hiernach verengte er diesen Spalt, bis ein vor das Feld der Mischfarbe gehaltenes Stäbchen zwei gleich dunkle farbige Schatten entwarf, und mass wieder die Breite des Spaltes. Das Verhältniss der beiden gemessenen Breiten ergab annähernd das Verhältniss der Helligkeiten beider Complementärfarben im Weiss.

Bei dieser Gelegenheit fand Helmholtz einen schon von Dove ausgesprochenen Satz bestätigt, dass nämlich zwei bei einer gewissen absoluten Lichtintensität gleich hell erscheinende Farben nicht mehr gleich hell erscheinen, wenn die Lichtmengen beider verdoppelt oder halbirt werden. Im ersten Fall erscheint vielmehr die minder brechbare der beiden Farben, im zweiten die stärker brechbare heller.

Helmholtz liess nämlich zwei farbige Lichtmengen durch die Spalten des Schirmes in solcher Menge dringen, dass sie gleich dunkle Schatten warfen, und brachte dann zwischen den Spiegel (des Heliostaten) und dem ersten Spalte (des oben beschriebenen Apparates) eine einfache oder mehrfache Lage eines dünnen weissen Gewebes, welches einen Theil des Sonnenlichtes zurückhält, ohne das Verhältniss seiner verschiedenartigen Bestandtheile zu verändern. Dann erschien der Schatten der minder brechbaren Farben dunkler als der brechbareren. Doch waren die Unterschiede sehr gering, so lange beide Farben aus der minder brechbaren Hälfte, Roth bis Grünblau, genommen wurden; viel auffallender dagegen zwischen denen der brechbareren Hälfte, und am

*) A. a. O. S. 18 f.

stärksten, wenn man Violett mit einer der minder brechbaren Farben mischte.

Uebrigens scheint sich der Farbenton der Mischfarben so gut wie gar nicht zu ändern, wenn die Lichtmenge vermehrt oder vermindert wird, während das Verhältniss der gemischten Lichter zu einander unverändert bleibt. Helmholtz vermuthet, dass der Grund davon hauptsächlich darin zu suchen sei, dass wir bei allen Graden der Helligkeit das Sonnenlicht als das normale Weiss betrachten, so dass, wenn in den künstlichen Farbenmischungen die blauen Farben bei geringer, die gelben bei grösserer Lichtstärke vorwiegen, dasselbe auch im Sonnenlichte der Fall sein muss. — Die Spalten im Schirme S_2S_2 müssen stets, sowohl bei geschwächtem als bei ungeschwächtem Sonnenlichte, von gleicher Weite sein, um aus den Complementärfarben Weiss zu erhalten, d. h. die Complementärfarben müssen, damit sie Weiss geben, in dem Intensitätsverhältnisse gemischt werden, in welchem sie im weissen Lichte vorkommen.

Helmholtz fand nun für die Helligkeit der complementären Farbenmengen annäherungsweise folgende Verhältnisse:

	bei starkem Lichte	bei schwachem Lichte
Violett zu Grüngelb	1 : 10	1 : 5
Indigo zu Gelb	1 : 4	1 : 3
Cyanblau zu Orange	1 : 1	1 : 1
Grünblau zu Roth	1 : 0,44	

54. Was Helmholtz auf dem bezeichneten Wege empirisch gefunden, hatte Grassmann*) schon früher gewissermassen a priori erwiesen, nämlich dass zu jeder Farbe eine andere homogene Farbe existirt, welche, mit ihr gemischt, farbloses Licht, d. h. Weiss giebt. Das Auge unterscheidet sowohl an dem farblosen Lichte, das man durch die Worte weiss oder grau bezeichnet, als auch an irgend einer homogenen Farbe die grössere oder geringere Intensität, die bestimmbar ist. Die Verschiedenheit der einzelnen homogenen Farben ist aber bedingt durch ihre verschiedene Brechbarkeit, die eine bestimmte Messung zulässt. Vermischt man nun eine homogene Farbe mit weissem Lichte, so wird der Farbeneindruck durch diese Beimischung abgeschwächt; er erscheint weniger gesättigt, d. h. weisslicher (blass, fahl, matt). Jeder derartige Farbeneindruck

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXIX. S. 69.

lässt sich aber in drei Momente zerlegen, nämlich in den Farbenton, der eben von der Brechbarkeit abhängt, in die Intensität der Farbe und in die Intensität des beigemischten Weiss.

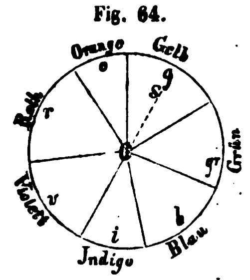
Man kann nun jeden Lichteindruck durch Mischung einer homogenen Farbe von bestimmter Intensität mit weissem Lichte von bestimmter Intensität nachahmen. Aendert sich das eine von den beiden zu mischenden Lichtern stetig, während das andere unverändert bleibt, so ändert sich auch der Eindruck der Mischung stetig. Ein Lichteindruck ändert sich aber stetig, wenn die beiden Intensitäten, nämlich die Intensität der Farbe und die des beigemischten farblosen (weissen) Lichtes, sich stetig ändern, und auch der Farbenton, falls die Intensität der Farbe nicht Null ist, sich stetig ändert. Ist nun die Intensität der Farbe Null, so ist das Licht ein farbloses, und in diesem kann ein Farbenton dadurch, dass die Intensität der Farbe stetig bis Null hin abnimmt, in jeden anderen, von ihm gänzlich getrennt liegenden Farbenton stetig übergehen, sobald die Intensität des letzteren von Null ab stetig wächst.

Die stetige Aenderung des Farbentones ist nun im Allgemeinen bedingt durch die stetige Aenderung der diesen Farbenton bestimmenden Brechbarkeit, nur mit dem Unterschiede, dass der Farbeneindruck des äussersten Violett sich wieder an den des äussersten Roth stetig anschliesst. Wirklich ist aber der Uebergang von Violett durch Purpur zum Roth für das Auge ein ebenso stetiger, wie zwischen irgend welchen zwei anderen Farben. Nennt man nun den Uebergang von Roth zu Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett, Purpur zurück zu Roth den positiven Uebergang, den umgekehrten den negativen, so kann jedes farbige Licht A in ein andersfarbiges Licht B auf drei verschiedene Arten stetig übergehen, nämlich entweder so, dass der Farbenton des Lichtes allmälig alle Farbentöne annimmt, die auf dem positiven Uebergange von A zu B liegen, oder alle, die auf dem negativen Uebergange liegen, oder endlich so, dass das Licht beim Uebergange einmal oder mehrmals farblos wird. — Auf diese einfachen Voraussetzungen stützt nun Grassmann*) die Beweisführung des Satzes, dass es zu jeder homogenen Farbe eine andere homogene Farbe giebt, die mit ihr gemischt Weiss liefert.

*) Vgl. a. a. O. S. 73 ff.

55. Newton *) gab eine empirische Regel zur Vorausbestimmung der Farbe, welche aus einer Vermischung einfacher Strahlen von gegebener Art und gegebenem Verhältnisse hervorgehen müsse. Man beschreibe nämlich von C aus einen Kreis mit einem der Einheit gleich gesetzten Halbmesser, theile seinen Umfang in sieben Theile, welche sich wie die Zahlen $^1/_9$, $^1/_{16}$, $^1/_{10}$, $^1/_9$, $^1/_{10}$, $^1/_{16}$, $^1/_9$ verhalten, so dass man durch Zurückführung dieser Theile auf Grade hat: $r = 60^0 45' 34''$, $o = 34^0 10' 38''$, $g = 54^0 41' 1''$, $gr = 60^0 45' 34''$, $b = 54^0 41' 1''$, $i = 34^0 10' 38''$, $v = 60^0 45' 34''$. Man betrachte nun diese verschiedenen Bogen nach der Reihe, in der sie aufeinander folgen, als die sieben Hauptfarben, welche das Spectrum des weissen Lichtes darstellen, so dass der volle Umkreis die ganze Reihe der Farbenabstufungen, durch welche das Licht von den ersten rothen bis zu den letzten violetten Strahlen hindurchgeht, vorstellt. Sodann bestimme man die Schwerpunkte aller dieser Bogen, und denke sich an jedem derselben ein der Länge des ihm entsprechenden Bogens proportionales Gewicht angebracht. Der gemeinschaftliche Schwerpunkt aller Gewichte fällt dann mit dem Mittelpunkte C zusammen, und dies entspricht dem Falle, wo das Auge vollkommenes Weiss wahrnimmt, dessen Empfindung durch den gleichzeitigen Eindruck aller Farbenabstufungen, bei einer Mischung nach Verhältnissen, wie sie von Natur im Spectrum vorkommen, erregt wird. Findet aber die Mischung nicht nach diesen Verhältnissen statt, wie in fast allen Farbenmischungen, welche kein Weiss geben, so wird man sich auf jeden partiellen Schwerpunkt nicht mehr das Totalgewicht des entsprechenden Bogens gelegt zu denken haben, sondern die Hälfte, das Drittel oder überhaupt den $n$ten Theil dieses Gewichts, je nachdem die gegebene Mischung die Hälfte, das Drittel etc. von all dem Lichte enthält, welches diese Farbe im Spectrum ausmacht. Sucht man jetzt den gemeinschaftlichen Schwerpunkt aller dieser partiellen Gewichte, so wird er in der Regel nicht mehr mit dem Mittelpunkte des ganzen Kreises zusammenfallen. Wohin er aber auch fallen mag, es sei

Fig. 64.

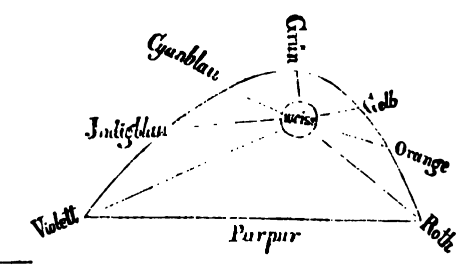


*) Optice. lib. I. Pars 2. prop. 6.

z. B. nach S, immer wird man nur von dem Mittelpunkte C zu diesem Punkte die Linie CS zu ziehen haben, deren Richtung dann die herrschende Farbe der Mischung, und ihre Länge, d. h. die Entfernung des Punktes S von der Mitte, die Intensität der Farbe ausdrücken wird. Fällt z. B. CS genau zwischen die benachbarten Grenzlinien des Orange und Grün, so wird die Farbe das reinste Gelb sein; nähert sich dagegen CS mehr der einen oder andern Linie, so wird sich das Gelb mehr ins Orange oder Grüne ziehen. Fällt bei der ersten Voraussetzung der Punkt S nahe an den Umkreis, so wird die Farbe im höchsten Grade gesättigt sein; fällt derselbe aber in die Mitte zwischen Umkreis und Centrum, so wird die Farbe nur halb so gesättigt sein, gleich einer Mischung des lebhaften Gelb mit ebenso viel Weiss.*)

56. Diese Methode Newton's zeigt sich in ihrem Princip sehr wohl geeignet, die Erfahrungen über Mischfarben auf einen einfachen Ausdruck zu bringen, obwohl die von ihm angegebene Vertheilung der homogenen Farben auf dem Umfange eines Kreises, wenn man den letzteren beibehalten will, jedenfalls zu modificiren ist. Sehr wahrscheinlich ist aber die Curve, in welcher die homogenen Farben anzuordnen sind, nicht einmal ein Kreisbogen. Dies folgt schon daraus mit einiger Evidenz, dass nach Helmholtz' Versuchen nicht alle Farben rücksichtlich ihrer Qualität gleich weit von Weiss abstehen, so dass also das letztere auch nicht im Mittelpunkte eines Kreises liegen kann. Setzt man die Einheiten der Helligkeit verschiedener Farben nach den unmittelbaren Angaben unseres Auges fest, so ist Roth etwa zweimal so weit vom Weiss entfernt als Grünblau, und Violett fünf bis zehnmal so weit als Grüngelb. Nach Helmholtz nimmt das Farbenfeld ungefähr die Form an, wie sie nachstehende Figur schematisch zeigt, in wel-

Fig. 65.



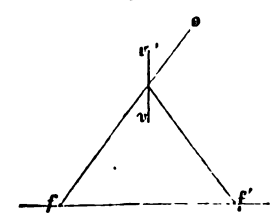
*) Vergl. bezüglich dieser Regel der Farbenmischung auch Grassmann: Poggend. Ann. Bd. 89. S. 75 ff.

cher der Uebergang zwischen Roth und Violett durch Purpur einstweilen durch eine gerade Linie angedeutet ist. Geht man nach den beiden Enden des Spectrums hin, so geben benachbarte Farben Mischungen vom Tone der zwischenliegenden Farbe und ziemlich gesättigter Färbung, weshalb hier die Curve wenig gekrümmt ist. Dagegen geben in der Gegend des Grün Töne, die wenig von einander verschieden sind, z. B. Grüngelb und Grünblau, schon ziemlich weissliche Mischungen; daher ist hier die Curve stärker gekrümmt.

Geht man in der Figur vom Punkte Weiss durch eine gerade Linie zu irgend einem Punkte der Peripherie, z. B. zu Gelb, so liegen auf dieser Linie alle Mischfarben, die uns gelb erscheinen und sich nur durch die Menge des beigemischten Weiss von einander unterscheiden. Das letztere herrscht um so weniger vor und die Farbe ist demgemäss um so gesättigter, je mehr man sich der Peripherie nähert. Je zwei complementäre Farben liegen einander diametral gegenüber, und ihre Verbindungslinie geht durch den Punkt Weiss.

57. Ausser den bereits mitgetheilten Verfahrungsweisen (S. 91 ff.) giebt es noch einige andere einfachere Methoden, um aus gegebenen Farben Mischfarben darzustellen, und zwar so, dass die letzteren im Wesentlichen mit denen übereinkommen, welche durch die Mischung entsprechender Spectralfarben erzeugt werden. So benutzte Helmholtz, und wohl auch Plateau, eine Methode, die in der Hauptsache darin besteht, dass man auf einer dünnen Glasplatte ein Spiegelbild eines farbigen Fleckes da entstehen lässt, wo bereits ein Fleck von bestimmter Farbe hervorgebracht ist. Man bringe ein Glasplättchen *vv* zwischen zwei farbige Flecke *f* und *f'*, etwa zwischen ein blaues und gelbes Papierstückchen oder dergl.; so dass man durch dasselbe den einen Fleck sieht, während das Spiegelbild des zweiten Fleckes mit dem ersten zusammenfällt. Es empfängt dann dieselbe Stelle der Netzhaut gleichzeitig die Strahlen beider Farbenflecke, deren Intensitätsverhältniss sich beliebig durch Hin- und Herneigen des Glasplättchens abändern lässt; denn die Intensität des gespiegelten Lichtes nimmt mit dem Einfallswinkel zu, die des durchgelassenen aber mit demselben ab.


Fig. 66.



Alle diese Methoden der Farbenmischung haben das Gemeinsame, dass die zu mischenden Farben gleichzeitig derselben Netzhautstelle des Auges dargeboten werden. Man erhält aber im Wesentlichen noch dieselben Resultate, wenn die betreffenden Farbestrahlen in sehr rascher Folge dieselbe Netzhautstelle treffen. Hierher gehören die Versuche mit dem Farbenkreisel. So pflegt man wohl einen Kreis, nach der von Newton angegebenen Regel, in farbige Felder zu theilen und auf diese einzeln möglichst schöne und reine Farbstoffe aufzutragen, in der Art, dass etwa $60^3/_4$ Grad mit Roth, $34^1/_4$ Gr. mit Orange, $54^2/_3$ Gr. mit Gelb, $60^3/_4$ Gr. mit Grün, $54^2/_3$ Gr. mit lichtem Blau, $34^1/_4$ Gr. mit Indigblau und $60^2/_3$ mit Violett gefärbt erscheinen. Befestigt man nun diese Scheibe an einen durch ihren Mittelpunkt gehenden Stift und setzt sie mittelst des letzteren in eine möglichst schnelle drehende Bewegung, so folgen die verschiedenen Farben so rasch aufeinander, dass sie das Auge nicht mehr zu unterscheiden vermag; sie erscheinen zusammen als eine graue Farbe, die sich dem reinen Weiss um so mehr nähern muss, je mehr die einzelnen Farben homogen rein sind. Auf ähnliche Weise kann man auch je zwei oder drei verschiedene Farben allein auf die Scheibe tragen und wird dann bei der Umdrehung der letzteren die Mischfarben erblicken, die den Verhältnissen, nach welchen die einzelnen Farben aufgetragen sind, entsprechen. Die Resultate sind denen ganz ähnlich, welche durch die Mischung der entsprechenden Spectralfarben erhalten werden. Zu diesen Versuchen mit dem Farbenkreisel ist ein von Grüel *) angegebener Apparat sehr geeignet. Die Rotation wird hier durch ein Uhrwerk vollzogen und ihre Geschwindigkeit kann durch eine Druckschraube regulirt werden. Dem Apparate sind überdies Scheiben zur Erzeugung von Mischfarben und zur Darstellung des Weiss durch die Vereinigung der sieben Hauptfarben beigefügt. Grüel bemerkt, dass das von Newton angegebene relative Verhältniss dieser Farben eine Abänderung nach Massgabe der uns gegenwärtig zu Gebote stehenden Pigmente erfordere, eine Abänderung, die nur auf empirischem Wege gefunden werden könne. **)

---

*) Poggendorff's Annal. Bd. LXXV. S. 524.

**) Ueber derartige Farbenmischungen vgl. auch Maxwell: Philos. Magaz. er. IV. Vol. XIV. p. 40.

Ebenfalls hierher gehört ein von Münchow angestellter Versuch. Wenn man nämlich einem Prisma vermittelst eines Uhrwerkes eine rasch oscillirende Bewegung ertheilt, so wird auch das durch das Prisma erzeugte und von einem Schirme aufgefangene Spectrum des Sonnenlichtes rasch hin und her bewegt, wodurch die Eindrücke aller einzelnen Farbestrahlen sich in raschem Wechsel dergestalt auf der Netzhaut des Auges mischen, dass man statt des Farbenspectrums einen Streifen sieht, der bis auf die Enden vollkommen weiss ist.

58. Dagegen erhält man durch die Mischung verschiedener Farbstoffe in der Regel ganz andere Farbentöne als durch die Mischung entsprechender Farbestrahlen nach den bisher angeführten Methoden. So erhält man durch Anwendung der letzteren z. B. aus Gelb und Blau nicht Grün, während dieses doch aus der Mischung eines gelben Farbstoffes mit einem blauen Farbstoffe resultirt. Dieser Unterschied ist, wie Helmholtz zuerst gezeigt, darin begründet, dass bei der Mischung von Pigmenten oder farbigen Pulvern das farbige Licht nicht unmittelbar von der äussersten Oberfläche reflectirt wird, sondern vielmehr aus dem Innern herausstrahlt, indem das auffallende Licht zum Theil durch die Farbstoffpartikeln hindurchdringt. Wo nun ein gelber mit einem blauen Farbstoffe gemischt ist, wird an der äusseren Oberfläche zwar eine gewisse Quantität Licht als weisses zerstreut werden, aber das aus der zunächst tiefer gelegenen Schicht zurückstrahlende Licht wird theils durch gelbe, theils durch blaue Partikeln hindurchgehen. Da nun die durchsichtigen Theilchen blauer Körper violettes, blaues und grünes, die Theilchen gelber Körper rothes, gelbes und grünes Licht hindurchlassen, so müssen die übereinander liegenden Theilchen beider Farbstoffe vorherrschend grünes Licht geben, das hier also nicht als zusammengesetzte Farbe, nämlich als Mischfarbe aus Blau und Gelb, erscheint. In derselben Weise erhält das Auge auch den Eindruck der grünen Farbe, wenn es durch ein gelbes und blaues Glas, von denen das eine auf dem anderen liegt, nach einem weissen Object sieht. Das blaue Glas an sich erscheint uns blau, weil es vorherrschend Strahlen von solcher Brechbarkeit durchlässt, welche die Empfindung des Blau erzeugen. Neben diesen lässt es aber auch violette und grüne Strahlen hindurch, während es die rothen und gelben fast vollständig absorbirt. Das als gelb bezeichnete Glas lässt dagegen

vorzugsweise die gelben, rothen und grünen Strahlen hindurch, in sehr geringer Menge aber die blauen und violetten. Daher werden die beiden Gläser zusammen den grünen Strahlen in vorherrschender Menge den Durchgang gestatten, so dass uns alle Gegenstände, die weisses Licht zerstreuen, durch eine Combination solcher Gläser angesehen grün erscheinen müssen.

Erfahren die verschiedenen Strahlen des Sonnenlichtes alle eine gleichmässige Absorption, so muss das übrig bleibende Licht ein getrübtes Weiss darstellen. Dove erhielt solches Licht, indem er ein bläulichgrünes, ein gelbes und violettes Glas aufeinander legte.

59. Man betrachtet die Farbe, welche ein Körper im Sonnen- oder Tageslichte zeigt, als die ihm eigenthümliche oder natürliche Farbe. Will man nun die natürliche Farbe der Körper untersuchen, nämlich erfahren, ob das von einem Körper ausgestrahlte Licht einfach oder zusammengesetzt ist, so lässt sich zweckmässig ein Prisma gebrauchen. Das Licht ist einfach, wenn es im Prisma keine Zerlegung erfährt, dagegen zusammengesetzt, wenn es durch das Prisma in verschiedenfarbige Bestandtheile zerlegt wird. So erscheint das Licht einer Flamme von stark verdünntem Weingeist, zumal wenn der Docht mit Kochsalz eingerieben ist, im Prisma bis auf den unteren Theil vollkommen gelb, ebenso auch, wie schon bemerkt, das Licht des im lebhaften Verbrennen begriffenen Schwefels. Meist ist jedoch das farbige Licht zusammengesetzt. Klebt man eine Reihe schmaler farbiger Papierstreifchen auf ein schwarzes Papier und betrachtet dieselben aus einer gewissen Entfernung durch ein Prisma, so lässt sich schon aus den durch das letztere bewirkten Farbenbildern erkennen, dass das Licht, welches von der Oberfläche eines farbigen Körpers ausgeht, nicht ausschliesslich aus solchen Strahlen besteht, welche die Empfindung der dem Körper eigenthümlichen Farbe vorzugsweise in uns erregen. — Ein Körper erscheint uns nun weiss, wenn er Licht verbreitet, das auf gleiche oder doch auf nahe gleiche Weise wie das Sonnenlicht zusammengesetzt ist. Und so muss denn natürlicher Weise ein im Sonnenlicht farbloser, d. h. weisser Körper, wofern er alle Strahlen, die im Sonnenlichte vorkommen, zu reflectiren vermag, farbig erscheinen, wenn das durch ein Prisma in seine Farbestrahlen zerlegte Sonnenlicht auf ihn fällt. Dagegen erscheint ein Körper schwarz, wenn er entweder gar kein Licht oder doch verhältniss-



mässig nur eine sehr geringe Menge weissen Lichtes zerstreut. Ferner ist ein Körper roth, wenn er entweder nur rothes Licht oder eine Mischung verschiedenartiger Strahlen reflectirt, worin die rothen vorherrschen. Und in ganz ähnlicher Weise erscheint ein Körper grün, falls er nur einfaches Grün oder ein Gemisch von Strahlen zerstreut, in welchen die grünen in vorherrschender Menge auftreten, u. s. w.

Absorbirt ein Körper alle Farbestrahlen des weissen Lichtes bis auf eine, die er zerstreut, so muss er in jedem anderen Lichte als diesem zerstreuten völlig dunkel erscheinen. Doch werfen viele Körper, wie schon oben bemerkt, ausser denjenigen Strahlen, welche die eigenthümliche Farbe desselben grossentheils bedingen, auch noch andere Farbestrahlen, allerdings in geringerem Masse, zurück; und man weiss ja auch, dass Körper, die im Sonnenlichte eine bestimmte Farbe zeigen, diese mehr oder weniger ändern, wenn sie von einem farbigen Lichte beleuchtet werden, das nicht wie das Sonnenlicht alle Farbestrahlen in sich zu Weiss vereinigt enthält. Hierher gehören auch die Farbenänderungen, die manche Stoffe des Abends bei Kerzenlicht darbieten.

60. So haben die verschiedenen Farben, in welchen die das Licht zerstreuenden Flächen der Körper uns erscheinen, ihren Grund darin, dass die Körper gewisse Farbestrahlen absorbiren, während sie andere reflectiren (zerstreuen). Natürlich muss nun die Farbe des Körpers, die eben durch die nicht absorbirten, also zerstreuten Strahlen bedingt ist, von der Farbe der Lichtquelle verschieden sein, falls diese letztere nicht etwa nur eine Art homogener Strahlen entsendet, die von dem betreffenden Körper nicht absorbirt werden können. Sendet die Lichtquelle verschiedene Farbestrahlen aus, von denen die einen absorbirt, die anderen zerstreut werden, so wird der Körper, durch welchen dies geschieht, uns gewiss in einer anderen Farbe als die Lichtquelle erscheinen müssen. Die absorbirten und zerstreuten Strahlen ergänzen sich aber zur Farbe der Lichtquelle und zwar zu Weiss, wenn die Beleuchtung des Körpers, der in der Farbe des zerstreuten Lichtes erscheint, vom Sonnenlichte herrührt.

Von den durchsichtigen Körpern gilt es ebenfalls, dass sie bestimmte Farbestrahlen des auf sie fallenden weissen Lichtes absorbiren, während sie andere durchlassen, die dann die Farbe des Körpers bestimmen (vgl. §. 58). Werden aber von einem Körper

alle Bestandtheile des weissen Lichtes gleichmässig durchgelassen, so erscheint derselbe farblos, und zwar um so mehr, je geringer und gleichmässiger die Absorption für alle Farbestrahlen ist.

Bei einer anderen Gelegenheit (S. 35) bemerkten wir, dass ein Gemenge verschiedener durchsichtiger Substanzen um so leichter vom Lichte durchstrahlt wird, je geringer der Unterschied im Brechungsvermögen derselben ist. Das Gegentheil wird stattfinden bei einem Gemenge durchsichtiger Substanzen, deren Brechungsquotienten sehr ungleich sind. In diesem Falle findet eine wiederholte totale Reflexion des einfallenden weissen Lichtes statt, besonders wenn das Licht aus dem dichteren durchsichtigen Mittel in ein dünneres einzudringen sucht; daher denn auch innige Gemenge solcher durchsichtigen Substanzen, die das Licht sehr ungleich brechen, wie z. B. Luft und Wasser als Schaum, Luft und Eiskrystalle als Schnee, blendend weiss erscheinen.

Erstreckt sich die Absorption des Lichtes in einem Körper zwar auf alle Farbestrahlen, aber nicht auf alle mit gleicher Stärke, so zeigt ein solcher Körper bei verschiedener Dicke eine verschiedene Färbung. — Manche Körper, die vorherrschend zwei Farbenbänder durchlassen, wie z. B. Chromchlorür, das Roth und Grün, violettes Glas, das Roth und Violett durchlässt, nennt man dichromatische Mittel, zu denen unter anderen auch Chromalaun gehört.

61. J. Herschel bemerkte bei einer Lösung von schwefelsaurem Chinin, die mit Wasser so weit verdünnt war, dass sie in durchgelassenem Lichte ganz durchsichtig und farblos erschien, eine eigenthümliche blaue Farbe, wenn sie unter einem gewissen Winkel zur Oberfläche betrachtet wurde. War die Flüssigkeit durch ein Bündel gewöhnlichen Tageslichtes beleuchtet, so erschien die blaue Farbe nur innerhalb einer sehr dünnen Schicht. Das durch die letztere gegangene Lichtbündel war aber nicht merklich geschwächt oder in seinem Farbenton verändert, hatte jedoch die Fähigkeit verloren, in einer zweiten Auflösung von schwefelsaurem Chinin, in die es eintrat, eine blaue Färbung zu bewirken. J. Herschel nannte ein derartig modificirtes Lichtbündel epipolisirt, in der Meinung, dass die Erscheinung durch eine eigenthümliche Beschaffenheit der Oberfläche bedingt werde. Es ist klar, dass wir es hier nicht mit einer gewöhnlichen katoptrischen Farbe zu thun haben; wir können nicht sagen, die blaue Farbe rühre hier daher,

weil die blauen Strahlen des einfallenden Lichtbündels vorzugsweise reflectirt, die anderen dagegen vorzugsweise absorbirt würden. Das durch die Lösung gegangene Licht zeigt bei einer prismatischen Zerlegung keinen Mangel in derjenigen Gegend des Spectrums, welcher die zerstreuten (blauen) Strahlen in Bezug auf den Grad der Brechbarkeit angehören.

G. Stokes, welcher diese Erscheinungen zuerst genauer untersuchte, bezeichnete sie durch das Wort „Fluorescenz," hergeleitet von Flussspath, indem eine gewisse Art dieses Minerals dieselbe darbietet.*) Stokes füllte ein Reagenzglas zur Hälfte mit einer Lösung von saurem schwefelsauren Chinin von der oben bezeichneten Beschaffenheit, bedeckte dasselbe mit schwarzem Papier mit einem zum Einlassen des Lichtes bestimmten Loche und stellte es dann senkrecht vor einem Fenster auf, so dass das Loch gegen das Tageslicht gekehrt war. Sah man nun in fast paralleler Richtung mit der Oberfläche des Glases in dieses hinein, so bemerkte man deutlich hinter dem Loche einen blauen Bogen, der sich nur wenig in die Flüssigkeit hinein erstreckte. Ein blass rauchfarbenes Glas, dicht vor das Loch gestellt, verhinderte die Bildung des blauen Bogens, dicht vor das Auge gehalten liess es aber eine grosse Menge des Lichtes, welches den blauen Bogen bildete, hindurch; nur erschien der Bogen mehr weisslich. Ein flohfarbenes Glas liess, unter denselben Umständen angewandt, den Bogen sehen, während es vor das Auge gehalten selbigen absorbirte. Ein gelbes und gelblichgrünes Glas liessen den Bogen in beiden Fällen, jedoch nicht in derselben Farbe, sehen.

62. Man leite Sonnenlicht durch einen senkrechten Schlitz in ein dunkles Zimmer und erzeuge mittelst eines Prisma ein reines Spectrum. Hält man nun das Reagenzglas mit schwefelsaurem Chinin (oder auch mit einer Lösung von Rosskastanienrinde) jenseits der äussersten rothen Strahlen des Spectrums, so ist nichts Auffallendes wahrzunehmen, auch dann noch nicht, wenn man das Glas allmälig weiter in die Farben des Spectrums hineinführt; die Flüssigkeit verhält sich wie Wasser. Sobald man aber die violette Seite des Spectrums erreicht hat, schiesst ein Schein von blauem Lichte quer durch die Flüssigkeit. Geht man noch weiter über

*) Vgl. über diese Erscheinung Poggend. Ann. Bd. LXXXVII. S. 480, Ergänzungsbd. IV. (XC*b*.) S. 177, Bd. XCVI. S. 526.

das Spectrum hinaus, so nimmt das blaue Licht anfänglich an Intensität zu und verschwindet dann allmälig ganz, aber erst weit jenseits des violetten Endes des auf einem Schirme sichtbaren Spectrums. Dieses blaue Licht, welches sich im Anfange durch das ganze Reagenzglas erstreckt, ist vor seinem Verschwinden auf eine äusserst dünne Schicht der Flüssigkeit an der Oberfläche derselben, durch welche das Licht einfällt, beschränkt.

Hiernach sind es also vorzugsweise die der violetten Seite des Spectrums angehörigen Strahlen, welche in der genannten Lösung die Fluorescenz bewirken. Die Strahlen, aus denen die Fluorescenzfarbe besteht, sind von geringerer Brechbarkeit als diejenigen Strahlen, welche in die Flüssigkeit eindringend das Phänomen der sog. Fluorescenz bedingen. So erscheint das Reagenzglas beim Eintauchen in die ultravioletten Strahlen, die unter gewöhnlichen Umständen der Wahrnehmung entgehen und den höchsten Grad der Brechbarkeit besitzen, von blauem Lichte erleuchtet, das aus Strahlen von geringerer Brechbarkeit besteht.

Ausser dem directen und zerstreuten Tageslichte hat man auch noch andere Lichtquellen zum Hervorbringen dieser Erscheinung geeignet gefunden. Das directe Sonnenlicht wird durch eine Oeffnung in ein dunkles Zimmer reflectirt und entweder unmittelbar oder nach dem Durchgange durch eine Linse auf die betreffende Substanz geleitet; das zerstreute Tageslicht lässt man ohne Weiteres durch eine Spalte in ein dunkles Zimmer fallen. Man erblickt dann die blaue Fluorescenzfarbe in dem wässerigen Extract der Rosskastanienrinde sehr gut, wenn man dieselbe in einem Reagenz- oder Trinkglas hinter die Spalte hält und die Flüssigkeit rechtwinklig zur Spalte betrachtet, besonders indem man das Glas dem Rande nahe hält, welcher von dem Beobachter der entferntere ist, weil dann das Glas einen dunklen Hintergrund erhält.

63. Das Phänomen der Fluorescenz ist weit verbreitet; man hat es bereits an einer sehr grossen Anzahl von Substanzen beobachtet, sowohl flüssigen wie starren, welche nicht einmal transparent zu sein brauchen. Die Fluorescenzfarbe ist aber verschieden. Eine Lösung von schwefelsaurem Chinin und der Absud der Rosskastanienrinde fluorescirt, wie wir schon wissen, blau, ebenso auch nach v. Salm-Horstmar*) ein Extract aus der Eschenrinde,

*) Poggend. Ann. Bd. XCVII. S. 637 u. 644.

Curcumätinctur grünlich, eine Lösung des Blattgrün (Chlorophyll) blutroth. Eine Art grünen Flussspathes fluorescirt roth, Kanarienglas im unzerlegten Sonnenlichte gelblichgrün. Werther*) untersuchte eine grosse Anzahl von Uranverbindungen und fand, dass sie alle durch das Violett des Sonnenspectrums zum Ausstrahlen eines gelblichen oder bläulichgrünen Lichtes veranlasst werden, während sie in den übrigen Theilen des Spectrums die betreffenden Spectralfarben unverändert lassen. Stokes fand auch gefärbte Zeuge, wie z. B. Saflorroth, scharlachfarbenes Tuch, mit Krapp gefärbte Stoffe fluorescirend. Dagegen zeigten sich Metalle und unter den nichtmetallischen Stoffen Kohle, Schwefel, Jod und Brom unempfindlich. Chlorgas zeigt Fluorescenz.

Schon Herschel hatte bemerkt, dass ein Lichtbündel, welches durch eine Chininlösung geleitet ist, bei seinem Durchgange durch eine Lösung von Rosskastanienrinde in dieser noch Fluorescenz bewirkt. Ganz Aehnliches fand auch der Fürst v. Salm-Horstmar. Wenn man nämlich Lösungen von Chlorophyll, Curcumätinctur und Absud der Rosskastanienrinde hinter ein Gefäss mit Chininlösung so stellt, dass die durch die letzteren gegangenen Lichtstrahlen die genannten Lösungen treffen müssen, so zeigen sich in diesen noch die ihnen eigenthümlichen Fluorescenzerscheinungen. Hiernach wurden über diesen Gegenstand Versuche von Guillemin**) mittelst eines Spectrums angestellt, das durch zwei hintereinander befindliche Quarzprismen gebildet war. Die Versuche führten zu folgenden Schlüssen: 1) Das Phänomen der Fluorescenz entsteht im Innern der Körper, und zwar in einem desto grösseren Abstande von der Oberfläche, je weniger brechbar die Strahlen sind. 2) Die durch ein fluorescirendes Mittel gegangenen Strahlen können dasselbe Phänomen zum zweiten Male erzeugen, wenn sie auf dieselbe Substanz oder auf andere mit derselben Eigenschaft begabte Substanzen fallen, vorausgesetzt, dass das erste Mittel keine zu grosse Dicke hatte; und was 3) die Dicke betrifft, die man einer Substanz geben muss, damit sie als fluorescirende Strahlen absorbirt und demzufolge auf keine zweite Substanz mehr einwirkt, so nimmt dieselbe sehr rasch zu, wenn man von den äussersten ultravioletten Strahlen gegen die rothen vorrückt.

---

*) Journ. für prakt. Chemie etc. Bd. LXV. S. 349.

**) Compt. rend. T. XLV. p. 773. — Poggend. Ann. Bd. CII. S. 637.

64. Die Fluorescenzerscheinung erinnert zum Theil an die schon früher bekannte Phosphorescenz, worunter man bekanntlich ein schwaches Leuchten versteht, das manche Körper im Dunkeln zeigen, ohne sich jedoch im Zustande des Verbrennens zu befinden. So giebt es ausser dem Diamanten noch viele Körper, die, eine Zeitlang dem directen Sonnenlichte oder auch nur dem Tageslichte ausgesetzt, im Dunkeln leuchten, wie man dies namentlich bei den kalkartigen Fossilien findet. Inzwischen fehlt es nicht an einem gewissen Gegensatze zwischen dem Phänomen der Phosphorescenz und Fluorescenz. Die Fluorescenz dauert nicht länger als ihre Ursache, d. h. sie kommt und verschwindet mit den Lichtstrahlen, durch welche sie veranlasst wird. Dies fand sowohl Stokes als auch Moser*), der die Versuche des ersteren wiederholte und bestätigt sah. Die phosphorischen Körper leuchten dagegen, nachdem sie dem Sonnenlichte ausgesetzt waren, mehr oder weniger lange fort. Sodann zeigen sich auch manche phosphorische Körper, wie Schwefelcalcium und Schwefelbarium, bezüglich der Fluorescenz unempfindlich. Endlich verbreitet sich die Phosphorescenz, wenn ein Theil des phosphorischen Körpers erregt ist, allmälig von selbst auf die benachbarten Theile, was bei der Fluorescenz nicht so der Fall ist.

Auf einige Analogien zwischen Fluorescenz und Phosphorescenz hat namentlich Osann**) hingewiesen. So sind es vorzugsweise die der violetten Seite des Spectrums angehörigen Strahlen, welche Phosphorescenz und Fluorescenz erregend wirken. Auch leuchten die Phosphore stets mit dem ihnen eigenen farbigen Lichte, gleichviel durch welche Farbestrahlen die Phosphorescenz in ihnen erregt worden. Osann glaubt nun aus den Versuchen über Fluorescenz schliessen zu können, dass farbige Strahlen andere nicht sichtbare mit sich führen, welche durch die fluorescirenden Substanzen in Farbestrahlen umgeändert werden, und dass das farbige Licht der Phosphore auf gleiche Weise entsteht. Phosphorische Körper, wie Realgar- und Schwefelantimonphosphor, leuchten schon bei der Bestrahlung des gewöhnlichen Tageslichtes mit ihren Farben. Beide Körper erscheinen bei auffallendem Tageslichte weiss. Unter diesen Umständen lässt sich jedoch ihre

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXIX. S. 165.

**) Poggend. Ann. Bd. XCIV. S. 640.

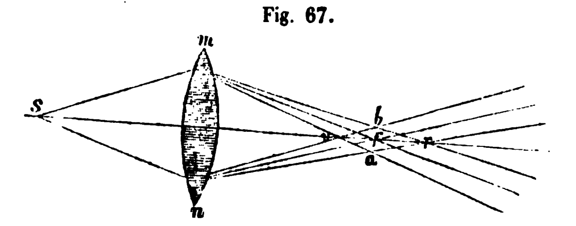
phosphorische Farbe, wegen Blendung des Auges, nicht wahrnehmen, während dieselbe alsbald hervortritt, wenn man die Körper nur halbdunkel hält; der erste leuchtet dann mit bläulichem, der zweite mit grünlichem Lichte. Der Reflex des weissen Lichtes dieser Phosphore rührt nach Osann von den gewöhnlichen Strahlen des Spectrums, das farbige phosphorische Licht dagegen von den sog. unsichtbaren*) oder brechbarsten Strahlen her, welche nach der Beschaffenheit der Phosphore in diese oder jene Farbestrahlen verwandelt werden.

Wenn nun in Bezug auf die Fluorescenz oder auch Phosphorescenz gesagt wird, dass Strahlen von grösserer Brechbarkeit in solche von geringerer Brechbarkeit umgewandelt würden, so darf man dies nicht ganz wörtlich nehmen. Eine solche Umwandelung braucht man rücksichtlich der besprochenen Phänomene in der That nicht anzunehmen, sondern nur dies, dass Strahlen von grosser Brechbarkeit in der fluorescirenden Substanz, indem sie etwa von dieser absorbirt werden, Veranlassung zu anderen Strahlen geben, denen ein geringerer Grad der Brechbarkeit zukömmt.

Wir werden im nächsten Kapitel, welches von der physikalischen Theorie der Lichterscheinungen handeln wird, noch einmal auf diese Erscheinungen zurückkommen.

65. Bei unseren früheren Betrachtungen über die Brechung des Lichtes in Linsen sahen wir davon ab, dass weisses Licht durch die Brechung in einem derartig gestalteten Medium auf ähnliche Weise wie in einem Prisma eine Farbenzerstreuung erfahren muss. Ist *s* ein leuchtender Punkt, der weisses Licht auf die

Fig. 67.



Convexlinse *mn* sendet, so werden die verschiedenartigen Bestandtheile dieses Lichtes eine ungleiche Brechung erfahren; die violetten Strahlen werden am stärksten, die rothen am schwächsten ge-

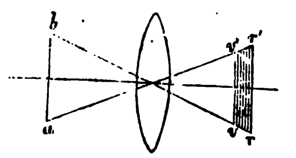


*) Vgl. § 47 d. W.

brochen (§. 42). Daher können die verschiedenen Farbestrahlen, in welche das weisse Licht durch die Brechung zerlegt wird, nicht gleiche Vereinigungsweite haben, d. h. nicht in demselben Punkte hinter der Linse zur Vereinigung gelangen. Die brechbarsten Strahlen werden sich in *v*, die von mittlerer Brechbarkeit in *f*, und die von geringster Brechbarkeit in *r* vereinigen, so dass in Bezug auf den Punkt *f* alle Strahlen in einem Kreise vom Halbmesser *ab* liegen. Diesen Kreis nennt man den Abweichungskreis und die durch die ungleiche Brechbarkeit der verschiedenen Farbestrahlen bedingte Farbenzerstreuung die **chromatische Abweichung** (von χρωμα, Farbe), welche von der (in §. 40 betrachteten) sphärischen Abweichung zu unterscheiden ist. Dieselbe verursacht aber, nicht minder wie die letztere, eine Undeutlichkeit der durch die Linse erzeugten Bilder, ja bei gewöhnlichen Linsen eine noch grössere, die jedoch dadurch eine Verminderung erfährt, dass das Licht im Punkte *f*, wo es weiss erscheint, am stärksten vereinigt ist und von hier nach dem Umfange hin abnimmt.

Hat man eine leuchtende Fläche *ab*, die weisses Licht auf die Linse sendet, so entsteht wegen der ungleichen Vereinigungsweite der verschiedenen Farbestrahlen eigentlich eine Reihe farbiger Bilder hinter der Linse, unter denen das violette Bild *vv'* das nächste, und das rothe *rr'* das entfernteste und grösste ist. In der Mitte decken sich diese Bilder, so dass man hier weiss sieht, während am Rande das gelbe und rothe Bild die anderen Bilder merklich überragen. Daher erscheint denn auch das physische Bild, welches durch die convexe Linse von einem Gegenstande bewirkt wird, von einem rothgelben Saume umgeben. Ist aber das Bild des Gegenstandes ein virtuelles vor der convexen Linse erscheinendes, so ist umgekehrt das violette Bild das entfernteste und grösste, und es entsteht ein bläulichvioletter Saum. Bei concaven Linsen ist das Bild des Gegenstandes von einem rothgelben Saume umgeben. Solche Linsen bewirken, wie wir aus §. 31 wissen, nur virtuelle Bilder, und zwar hier, wo von einem Object weisses Licht eindringt, so, dass die am wenigsten brechbaren rothen Strahlen ein von der Linse entfernteres und grösseres Bild als die violetten Strahlen geben. Daher der rothgelbe Saum.

Fig. 68.

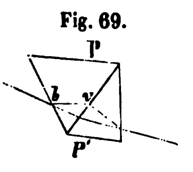


66. Man kann nun die durch ein Prisma bewirkte Farbenzerstreuung aufheben, wenn man dasselbe mit einem anderen gleich grossen von derselben Substanz in der Art verbindet, dass die brechenden Winkel beider Prismen eine entgegengesetzte Lage haben. Das ganze System verhält sich dann wie ein Glas mit parallelen Grenzebenen, bei dem mit der Farbenzerstreuung auch die dem Prisma eigenthümliche Ablenkung der Lichtstrahlen aufgehoben ist. Da sich nun eine convexe Linse als ein Aggregat von Prismen, deren brechende Winkel nach der Peripherie, und eine concave als ein Aggregat von Prismen betrachten lässt, deren brechende Winkel nach dem Centrum hin liegen; so könnte man auch die Farbenzerstreuung einer convexen Linse durch Combination der letzteren mit einer concaven Linse von demselben Glase und demselben Krümmungshalbmesser aufheben, aber auch nur so, dass mit der Farbenzerstreuung zugleich die sonstige optische Eigenthümlichkeit der Linse wegfiele. Dagegen giebt es eine Combination von Prismen aus verschiedenen durchsichtigen Substanzen, durch welche ein hindurchgehender weisser Lichtstrahl zwar noch in der dem Prisma eigenthümlichen Weise abgelenkt, aber nicht mehr in divergente und somit sichtbare Farbestrahlen zerlegt wird. Ein so zusammengesetztes Prisma nennt man ein achromatisches (farbloses).

So lange die ungleich brechbaren Strahlen des Sonnenlichtes zusammen in einer gemeinsamen (parallelen) Richtung zu unserem Auge gelangen, findet keine Farbenzerstreuung statt; daher z. B. eine weisse Glasplatte mit parallelen Oberflächen keine Farbenerscheinung darbietet. Durch ein Prisma werden aber die verschiedenartigen Strahlen des weissen Lichtes so gebrochen, dass sie nach ihrem Austritte aus demselben divergiren; daher das Spectrum. Will man nun bei einem Prisma die Farbenzerstreuung wegschaffen, so muss man es dahin bringen, dass die ungleich gebrochenen Strahlen unter einander parallel austreten, ohne aber ihre Ablenkung ganz aufzuheben, falls das Prisma seine sonstige optische Eigenthümlichkeit behalten soll. — Setzt man zwei Prismen so zusammen, dass die brechenden Winkel nach entgegengesetzten Richtungen gekehrt sind, so muss in Folge der entgegengesetzten Brechung der Strahlen in beiden Prismen die Farbenzerstreuung des einen durch die des anderen mehr oder weniger aufgehoben werden. Ist P ein Prisma aus Crownglas, so wird

durch dasselbe der einfallende Strahl *ab* in seine farbigen Bestandtheile zerlegt, wovon die äussersten der rothe Strahl *br* und der violette *bv* sind. Die Ablenkung dieser Strahlen wird dann in dem zweiten Prisma P' aus Flintglas, wegen der Lage des brechenden Winkels, im entgegengesetzten Sinne der vorigen geschehen. Besitzen nun die brechenden Winkel beider Prismen ein richtiges Verhältniss zur Farbenzerstreuung derselben, so werden der rothe und violette Strahl in gemeinsamer Richtung aus dem Prisma P' hervortreten.

Fig. 69.



Ist der brechende Winkel des einen Prisma bekannt, so kann man berechnen, wie gross der des anderen sein muss, wenn beide eine gleiche Farbenzerstreuung gewähren sollen. Die totale Zerstreuung des Flintglases ist 2,089 mal grösser als die des Crownglases; daher muss der brechende Winkel des Flintglasprisma 2,089 mal kleiner als der des Crownglasprisma sein, um den bezeichneten Zweck zu erreichen. Wenn also der brechende Winkel des Prisma aus Crownglas $= 30^0$ ist, hat man den des Flintglasprisma $= \frac{30}{2,089} = 19^0$ zu nehmen. Combinirt man zwei derartige Prismen in obiger Weise, so wird die Farbenerscheinung wegfallen, da die Farbenzerstreuung des einen Prisma der des anderen gleich ist und im entgegengesetzten Sinne geschieht, obwohl noch immer, wegen der Differenz der brechenden Winkel (30^0 und 19^0), eine Brechung der Lichtstrahlen stattfinden wird.

Hierzu sei noch bemerkt, dass man den Unterschied zwischen dem Brechungsexponenten der rothen und violetten Strahlen die Zerstreuung (Dispersion) des Lichtes in einem prismatischen Medium, und zwar, weil Roth und Violett die äussersten Strahlen bilden, die totale Dispersion nennt, wo dann der Unterschied der Brechungsexponenten für je zwei mittlere Farben die partielle Dispersion heisst. Das sog. Zerstreuungsvermögen eines prismatischen Mediums ist aber, wenn n', n und n'' die Brechungsexponenten für die rothen, mittleren und violetten Strahlen sind, durch den Quotienten $\frac{n''-n'}{n-1}$ gegeben.

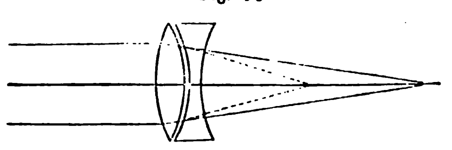
67. Obwohl nun im Allgemeinen die Substanzen, welche das Licht am stärksten brechen, dasselbe auch am meisten zerstreuen, so ist doch das Brechungsvermögen nicht der Farbenzer-

streuung proportional. So haben Crown- und Flintglas einen fast gleichen mittleren Brechungsexponenten, während die Farbenzerstreuung des letzteren unter sonst gleichen Umständen viel grösser als die des ersteren ist. Bestände zwischen dem Brechungsvermögen und der Farbenzerstreuung eine genaue Proportionalität, so würden ein Flintglas- und Crownglasprisma nur bei gleicher Ablenkung der Strahlen ein gleich langes Spectrum geben, wo dann durch die obige Combination beider Prismen mit der Farbenzerstreuung zugleich die Ablenkung der Strahlen aufgehoben wäre.

Ist auf die angegebene Weise eine Vereinigung der äussersten Farbestrahlen bewirkt, so folgt daraus noch nicht das Zusammenfallen der mittleren Farbestrahlen. Die Vereinigung auch der letzteren würde stattfinden, wenn die Strahlen im Spectrum des Flintglases in demselben Verhältnisse wie in dem des Crownglases vertheilt wären, was nicht der Fall ist.

In ähnlicher Weise aber wie beim Prisma lässt sich die Farbenzerstreuung auch bei einer Linse hinwegschaffen. Setzt man eine Sammellinse aus Crownglas mit einer Hohllinse aus Flintglas zusammen, so wird die Convergenz der Strahlen, welche erstere

Fig. 70.



bewirkt, durch letztere kleiner, und eben dadurch auch die Farbenzerstreuung vermindert. Hat man auf diese Weise die äussersten rothen und violetten Strahlen in einem Punkte vereinigt, so kann immer noch eine Abweichung der mittleren Strahlen übrig bleiben, falls sich die verschiedenen Farbestrahlen in beiden Substanzen nicht in demselben Verhältnisse ausbreiten. Um auch diese Abweichung fortzubringen, müsste man noch eine dritte Linse anwenden, in der Art, dass man zwei Sammellinsen aus Crownglas mit einer Hohllinse aus Flintglas verbindet. Solche Linsen nun, bei denen die Vereinigungspunkte der verschiedenen Farbestrahlen in einen Punkt zusammenfallen, nennt man achromatische Linsen, und von ihnen macht man bei Mikroskopen und Fernröhren anstatt der einfachen Objectivlinsen Gebrauch, um die durch

die chromatische Abweichung bewirkte Undeutlichkeit der Bilder zu beseitigen.

Die obige achromatische Linsencombination, welche von J. Dollond herrührt, hat man noch in der Weise modificirt, dass man die beiden Linsen nicht dicht aneinander, sondern vielmehr in einer gewissen Entfernung voneinander bringt, was, wegen der Schwierigkeit grössere homogene Flintglasstücke zu bekommen, namentlich den Vortheil gewährt, dass man eine Convexlinse von Crownglas durch eine verhältnissmässig viel kleinere Linse von Flintglas achromatisiren kann. Diese Einrichtung, von Littrow und Stampfer genauer berechnet, findet sich in den zuerst von Plössl ausgeführten sog. dyalitischen Fernröhren. — Endlich nennt man eine Linsencombination, bei der ausser der chromatischen Abweichung auch die sphärische (S. 74) beseitigt ist, eine aplanatische Linse.

Drittes Kapitel.

Physikalische Theorie der Lichterscheinungen.

68. Die Wechselwirkung zwischen unseren verschiedenen Sinnesorganen und den Objecten der Aussenwelt geschieht nicht unmittelbar, etwa durch den absolut leeren Raum hindurch. Vielmehr erfordert der Tast- wie der Geschmackssinn eine Berührung mit den Körpern, und der letztere überdies noch Auflöslichkeit der betreffenden Stoffe im Speichel. Auch der Geruchssinn wird durch die sog. Riechstoffe nur erregt, wenn dieselben mit ihm auf eine bestimmte Weise in Berührung kommen. Und bezüglich des Gehörorgans ist es erwiesen, dass die Töne, die wir empfinden und äusseren Körpern zuschreiben, ihre Ursache zunächst in gewissen Oscillationen der Massentheilchen dieser Körper haben, — in Oscillationen, welche die umgebende Luft in fortschreitende Schwingungen, d. h. in eine Wellenbewegung versetzen, die nun in unserem Gehörorgane ebenfalls Schwingungen erregt, durch welche schliesslich die eigenthümliche Tonempfindung veranlasst wird. — Nun ist nicht anzunehmen, dass dem Gesichtssinne die Körper unmittelbar ihre Gestalten aufdringen; vielmehr muss auch hier

ein Medium vorhanden sein, durch welches das Sehen der Körper vermittelt wird. Dieses Medium kann freilich nicht die gewöhnliche atmosphärische Luft sein, da wir die Körper auch im luftleeren Raume noch sehen würden, und noch weniger ist, aus gar leicht begreiflichen Gründen, die Annahme zulässig, dass sich von allen Punkten der sichtbaren Körper materielle Theilchen losreissen, die ihren Weg durch unser Auge nehmend einen Eindruck auf den Sehnerven machen. Das erforderliche Medium kann aus keinem der bekannten wägbaren Stoffe als solchem bestehen, sondern nur ein eigenthümlicher Stoff sein, der zwar an sich unabhängig von den Massentheilchen der Materie ist, aber doch in Verbindung mit ihnen den Erscheinungen des Lichtes und auch der Wärme zu Grunde liegt.

69. Zwei Ansichten waren es vorzugsweise, die sich bei Erklärung der Lichterscheinungen neben- und gegeneinander zu behaupten suchten, nämlich die Emanations- oder Emissionstheorie und die Undulationstheorie, die man auch die Oscillations- oder Vibrationstheorie nennt.

Nach der Emissionstheorie, der namentlich Newton zuerst Geltung verlieh, besteht das Licht aus einem feinen Stoffe, dessen Theilchen von den selbstleuchtenden Körpern unmittelbar nach allen Richtungen ausgestrahlt werden und in anderen Körpern durch Anziehung und wohl auch durch Abstossung mancherlei Modificationen ihrer Bewegungszustände erleiden, woraus die verschiedenen Erscheinungen des Lichtes resultiren sollen.

Dagegen ist nach der Undulationstheorie der Weltraum, so weit ihn das Licht zu durchdringen vermag, wie auch das Innere der Körper von einem feinen elastischen Medium erfüllt, das man Aether nennt. Dieser Aether besteht aus einzelnen Elementen (Atomen), die einander abstossen, von den Grundatomen der Materie aber angezogen werden. Sonach ist nun jedes Atom der Materie, in Folge der Anziehung zwischen ihm und den Aetheratomen, von einer verdichteten Aethersphäre umhüllt, während die im Raume freien Aetheratome sich vermöge wechselseitiger Abstossung in einer bestimmten gegenseitigen Stellung zu behaupten streben. So lange nun die Aetheratome sich in einem gewissen Gleichgewichtszustande befinden, herrscht Dunkelheit, werden sie aber in eine bestimmte schwingende Bewegung versetzt, was eben durch die selbstleuchtenden Körper geschieht, so tritt die Erschei-

nung des Lichtes hervor, falls diese Bewegung sich bis zur Nervenhaut unseres Auges fortpflanzen kann. Indem aber die Wellenbewegung des Aethers in verschiedenen Körpern verschiedentlich modificirt wird, erzeugt sie die mannigfachen Erscheinungen, welche wir am Lichte wahrnehmen, wenn es mit diesem oder jenem Körper zusammentrifft.

Beide Ansichten, die Emissions- und Undulationstheorie, kommen in der Nothwendigkeit überein, etwas von den Grundatomen der wägbaren Materie Verschiedenes anzunehmen, was die Phänomene des Lichtes zu vermitteln hat. Auch kann man noch, wie ich bereits an einem anderen Orte hervorgehoben habe, die sog. Newton'sche Lichtmaterie mit dem Aether zusammenfallen lassen, so dass dann für beide Ansichten dieselbe Grundannahme bezüglich des Substrates der Lichterscheinungen bestehen, und der wesentliche Unterschied zwischen denselben nur in der Art und Weise liegen würde, wie sie den Aether zur Erklärung der Lichterscheinungen benutzen. Im Sinne der Emissionstheorie könnte man dann die Sache im Allgemeinen folgendermassen ansehen. Während nämlich der Aether in Folge seiner Anziehung zu den Kernatomen der Materie sich um dieselben verdichtet, wird die Repulsion zwischen seinen eigenen Elementen verstärkt, woraus eine Ausstrahlung des Aethers nach allen Richtungen resultirt. Eine solche Ausstrahlung des Aethers dürfte bei allen Körpern vorkommen, so dass Sonne und Planeten sich denselben wechselseitig zusenden möchten, aber nur bei den sog. selbstleuchtenden Körpern würden die Aetherelemente eine solche Geschwindigkeit erlangen, dass sie die Erscheinung des Lichtes sofort in uns erregen könnten, während die übrigen Körper nur durch Reflexion des von den selbstleuchtenden Körpern empfangenen und an ihrer Oberfläche verdichteten Aethers sichtbar würden. Hingegen ist der Aether, nach der Undulationstheorie, ausser den Sphären, die er um die Kernatome der Materie in concentrischen Schichten gebildet, im Weltraume als ein elastisches Fluidium verbreitet, das zunächst von Seiten der selbstleuchtenden Körper in eine Wellenbewegung (Undulation) versetzt wird, und mittelst dieser die Erscheinungen des Lichtes bewirkt.

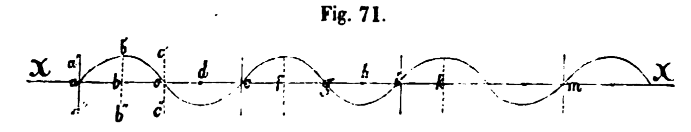
Die Undulationstheorie hat sich, zurückgeführt auf die allgemeinen Gesetze der Wellenbewegung eines elastischen Systems von Punkten, durch ihre Fruchtbarkeit bewährt, und namentlich



sind es die sog. Interferenzerscheinungen des Lichtes, welche die Richtigkeit dieser Ansicht auf eine überzeugende Weise dargethan haben, so dass die Emissionstheorie allem Anscheine nach nur noch ein historisches Interesse besitzt.

70. Sei nun in nebenstehender Figur XX die Richtung, nach welcher sich ein elementarer Lichtstrahl von einer Lichtquelle

Fig. 71.



aus fortpflanzt. Die Fortpflanzung des Lichtes geschieht aber nach der Undulationstheorie dadurch, dass alle Aethertheilchen, welche im Falle des Gleichgewichtes auf der Geraden XX liegen, successiv in Schwingungen gerathen, deren Richtung auf XX senkrecht ist. Jedes Theilchen schwingt in diesem Sinne zwischen bestimmten Grenzen hin und her. Seine Geschwindigkeit nimmt allmälig ab mit wachsender Entfernung von der Gleichgewichtslage und wird gleich Null, wenn das Theilchen den Grenzpunkt seiner Bahn erreicht hat. Hierauf kehrt es mit zunehmender Geschwindigkeit in die Gleichgewichtslage zurück, erreicht in dieser das Maximum seiner Geschwindigkeit und weicht dann nach der entgegengesetzten Seite aus. — Man nennt nun den Weg des Aethertheilchens von der Gleichgewichtslage a bis zu dem Grenzpunkte a' und von hier nach dem anderen Grenzpunkte a'' bis wieder zurück in die Lage a eine Schwingung (Oscillation, Vibration), die grösste Ausweichung ($aa' = aa''$) desselben von der Gleichgewichtslage a die Schwingungsweite (Amplitude), und endlich die Zeit, worin eine Oscillation vollendet wird, die Schwingungs- oder Oscillationsdauer.

Während ein zunächst der Lichtquelle gelegenes Aethertheilchen eine vollständige Oscillation macht, wird sich die schwingende Bewegung, in Folge des elastischen Zusammenhanges der Aethertheilchen untereinander, bis zu einem gewissen anderen Theilchen e fortpflanzen, welches dann in demselben Moment zu schwingen anfängt, worin das Theilchen a seine zweite Oscillation beginnt. Von diesem Augenblick an befinden sich beide Aethertheilchen, a und e, in gleichen Schwingungszuständen, indem sie gleichzeitig die Mitte und Grenzpunkte ihrer Bahn erreichen. Ebenso wie von a

nach *e* pflanzt sich die schwingende Bewegung vom letzteren weiter fort, während es eine vollständige Oscillation macht und durch seine Bewegung auch die folgenden Theilchen aus ihrer Gleichgewichtslage bringt, so dass das Theilchen *i* in demselben Moment seine erste Schwingung beginnt, worin *e* seine zweite und *a* seine dritte anfängt. Die Strecke nun, durch welche sich die schwingende Bewegung während der Zeit fortpflanzt, worin ein Aethertheilchen eine vollständige Oscillation vollendet, heisst eine Wellenlänge. Dieselbe ist also die Entfernung zweier nächsten Aethertheilchen, wie *a* und *e*, oder *e* und *i*, etc., die sich fortwährend in gleichen Schwingungszuständen befinden. Und demgemäss werden auch solche Aethertheilchen, die um ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge auseinanderliegen, wie z. B. die Theilchen *a* und *i*, oder *a* und *m*, sich stets in einerlei Schwingungszuständen befinden. Ebenso ist es mit den Theilchen *b* und *f* oder *f* und *k*, die ebenfalls um eine Wellenlänge von einander entfernt sind und stets gleichsinnige Schwingungen vollziehen. Dagegen befindet sich ein Aethertheilchen *c*, das in der Mitte zwischen *a* und *e* liegt und also um eine halbe Wellenlänge von jedem der letzteren entfernt ist, in Bezug auf diese in einem entgegengesetzten Schwingungszustande; nämlich so, dass es unterhalb XX' im Grenzpunkte c'' seiner Bahn angelangt ist, wenn *a* und *e* oberhalb XX' die Grenzpunkte ihrer Bahn erreicht haben. In gleicher Weise verhält es sich mit *b* und *d*. Zwei Aethertheilchen also, die um eine halbe Wellenlänge von einander entfernt sind, bewegen sich mit gleichen, aber der Richtung nach entgegengesetzten Geschwindigkeiten. Dasselbe gilt auch für Aethertheilchen, die wie *a* und *g* oder wie *b* und *h* um $^3/_2$ Wellenlänge, und überhaupt für solche, welche um ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge voneinander entfernt sind.

71. Jedes Aethertheilchen besitzt also in jedem Punkte seiner Bahn eine bestimmte Geschwindigkeit und Richtung seiner Bewegung, so dass jedem Augenblick ein bestimmter Bewegungszustand entspricht, den man die Phase der Schwingung nennt. Die Phase ist bestimmt durch die Lage des bewegten Aethertheilchens in Bezug auf seine anfängliche Gleichgewichtslage und durch seine Entfernung von der letzteren. Die Zeit, welche bis zum Eintritt einer bestimmten Phase vergeht, wird Phasenzeit genannt. Denken wir uns auf der Schwingungsbahn $a'a''$ eines

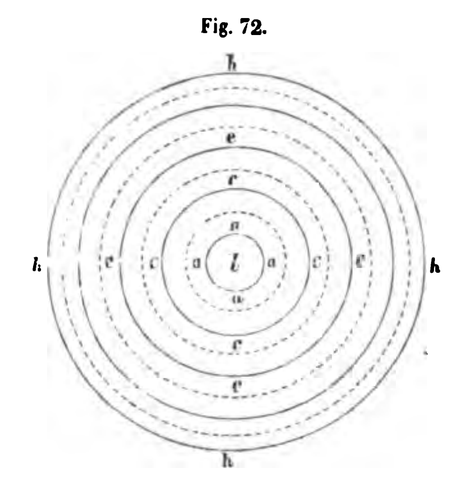


Aetheriheilchens (Fig. 71) zwei Punkte auf entgegengesetzten Seiten der Ruhelage *a* und zwar in gleicher Entfernung von derselben, so besitzt das Aethertheilchen in ihnen von einer halben Schwingungsdauer zur anderen gleiche, aber der Richtung nach entgegengesetzte Geschwindigkeiten. Solche Phasen nennt man entgegengesetzte, in denen also das Aethertheilchen in Bezug auf den Ruhepunkt *a* eine entgegengesetzte Lage und Bewegungsrichtung hat, während übereinstimmende Phasen durch gleiche Geschwindigkeit und gleiche Bewegungsrichtung charakterisirt sind.

Da nun die Aethertheilchen, welche in der Richtung der Wellenfortpflanzung liegen, successiv in die schwingende Bewegung gerathen, so können mehrere derselben nie zugleich, sondern nur successiv in entsprechende Punkte ihrer Schwingungsbahnen gelangen. Daher müssen alle oscillirenden Aethertheilchen zusammen, in ähnlicher Weise wie die Theilchen einer gespannten Saite, die durch einen Schlag an einem ihrer Enden in Schwingungen versetzt ist, eine krumme Linie bilden. Die obige Curve stellt die gegenseitige Lage der Aethertheilchen für einen bestimmten Augenblick der Bewegung dar.

So besteht nun jeder Lichtstrahl im Sinne seiner Fortpflanzung aus einer Summe gleicher Stücke, deren Ausdehnung mit der Länge einer Welle übereinkommt, also kurz aus einer Summe von Wellenlängen. Jede einzelne Welle (*ae*, *ei*, ...) zerfällt aber in zwei Hälften, deren Aethertheilchen in Hinsicht auf ihre Ruhelage entgegengesetzte Schwingungen vollziehen. Zwei Aethertheilchen, die um eine Wellenlänge oder um ein Vielfaches einer Wellenlänge voneinander abstehen, befinden sich in übereinstimmenden Phasen, solche dagegen, welche um eine halbe Wellenlänge oder um ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge entfernt sind, in entgegengesetzten Phasen. — Ein Inbegriff elementarer Lichtstrahlen von der Art des bezeichneten bildet aber ein Wellensystem, das man auch einen physischen Lichtstrahl nennt, insofern dasselbe einen merklichen Eindruck auf unser Auge hervorzubringen vermag. Nun erregt ein leuchtender Punkt (Fig. 72) in dem umgebenden Aether nach allen Richtungen Wellen, und zwar, wenn die Elasticität des Aethers nach allen Richtungen dieselbe ist, ein sphärisches Wellensystem. Alle Aethertheilchen, die rings in gleicher Entfernung von dem leuchtenden Punkte, dem Mittelpunkte der Gleichgewichtsstörung, liegen, befinden sich in denselben

Fig. 72.



Schwingungszuständen, während für die Theilchen, die zwischen zwei Kugelschalen liegen, deren Entfernung gleich einer Wellenlänge *ae* ist, verschiedene Schwingungszustände bestehen. Jede Welle $ae = eh = \ldots.$ besteht hier aus zwei concentrischen Hälften *ac*, *ce*, deren Aethertheilchen so schwingen, wie es oben bezüglich der Hälften einer Wellenlänge (Fig. 71) angedeutet ist.

72. Bezeichnet v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung, d. h. die Raumstrecke, durch welche sich das Licht in 1 Secunde fortpflanzt, so ist eine Zeit $= \frac{x}{v}$ nöthig, damit sich die schwingende Bewegung von dem leuchtenden Punkte bis zu einem Aethertheilchen in der Entfernung x fortpflanze. Zur Anregung eines Aethertheilchens, das gerade um eine Wellenlänge $= l$ von dem leuchtenden Punkte entfernt liegt, ist die Zeit $= \frac{l}{v}$ erforderlich. Da nun ein Aethertheilchen eine vollständige Schwingung in derselben Zeit vollendet, in welcher sich die schwingende Bewegung durch die Länge l einer Welle fortpflanzt, so ist auch, wenn man die Schwingungsdauer durch t bezeichnet, $t = \frac{l}{v}$, und hieraus $l = vt$. Hiermit haben wir eine einfache Relation gewonnen, nämlich zwischen der Wellenlänge l, der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung (Undulation) oder der sog. Geschwindigkeit des Lichtes und der Schwingungsdauer t der Aethertheilchen, welche die Lichtwelle constituiren.

Die Stärke oder Intensität des Lichtes ist nun bedingt durch die Schwingungsweite (Amplitude), also durch die Grösse der Abweichung der Aethertheilchen von ihrer Gleichgewichtslage, und zwar so, dass sich die Intensität eines Lichtstrahles in verschiedener Entfernung von der Lichtquelle wie die Quadrate der Schwingungsweiten verhält. Dies ergiebt sich leicht aus der Formel für die sog. Vibrationsintensität.

Man versteht unter der Vibrationsintensität den grössten Werth der Schwingungs- oder Vibrationsgeschwindigkeit, welchen die letztere während der Schwingung eines Aethertheilchens in seiner Bahn erreichen kann. Für diese Vibrationsintensität hat man den Ausdruck $\frac{2a\pi}{t}$ gefunden, wo a die Schwingungsweite, t die Schwingungsdauer und π das bekannte Verhältniss des Durchmessers zur Peripherie eines Kreises bezeichnet. Die Lichtstärke ist nun dem Quadrate der Vibrationsintensität proportional. Daher werden sich für zwei verschiedene Entfernungen, denen die Vibrationsintensitäten $\frac{2a\pi}{t}$, $\frac{2a'\pi}{t}$ zukommen, die Lichtintensitäten wie $\left(\frac{2\pi}{t}\right)^2 . a^2 : \left(\frac{2\pi}{t}\right)^2 . a'^2$, also wie $a^2 : a'^2$, d. h. wie die Quadrate der Schwingungsweiten verhalten.

Während nun bei homogenem Lichte, dessen sämmtlichen Strahlen dieselbe Wellenlänge zukommt, die Intensität allerdings, unabhängig von der Wellenlänge, dem Quadrate der Schwingungsweite proportional ist, hat man dagegen bei verschiedenen Farbestrahlen, wenn man deren Intensitäten miteinander in Beziehung bringen will, auch noch die Wellenlänge (oder Schwingungsdauer) zu berücksichtigen, d. h. die Geschwindigkeit, womit die Oscillationen der Aethertheilchen geschehen. In diesem Falle findet die Lichtintensität ihren Ausdruck in der Formel $2\pi^2 \frac{a^2}{t^2}$, worin a wieder die Schwingungsweite und t die Schwingungsdauer bezeichnet. Sonach ist die Intensität dem Quadrate der Schwingungsweite direct, dem der Schwingungsdauer aber umgekehrt proportional, mithin bei constanter Schwingungsweite um so grösser, je schneller die Oscillationen eines Aethertheilchens aufeinander folgen.

Die Schwingungsweite ist unabhängig von der Wellenlänge $l = vt$. Diese letztere bleibt während des weiteren Fortschrittes

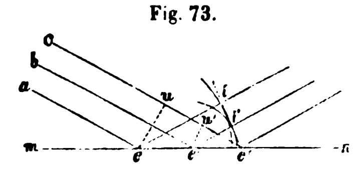
der Wellenbewegung stets eine constante Grösse, indem sie immer die Entfernung je zweier Aethertheilchen bezeichnet, die sich in gleichen Schwingungszuständen befinden, oder die Strecke, durch welche sich die undulatorische Bewegung fortpflanzt, während ein gewisses Aethertheilchen eine Oscillation vollendet. Dagegen nimmt die Schwingungsweite der Aethertheilchen beim Fortschreiten der Wellenbewegung ab. Dieselbe vermindert sich bei einem sphärischen Wellensysteme in dem Masse als der Raum grösser wird, den die Welle einnimmt. Während die Länge einer Aetherwelle ($ae = eh = \ldots$; Fig. 72) immer dieselbe bleibt, erhält die letztere selbst einen immer grösseren Umfang, indem die Kugel, welche das Wellensystem darstellt, beim Fortschreiten der Wellenbewegung immer grösser wird. Nun nimmt die Kugel im quadratischen Verhältniss ihres Halbmessers an Umfang zu, die Grösse der Bahn aber, die jedes durch die Welle bewegte Aethertheilchen während der weiteren Ausbreitung derselben beschreibt, in demselben Verhältnisse ab. Daher nimmt auch die Stärke des Lichtes in diesem Verhältnisse mit wachsender Entfernung der Aetherwelle von dem Orte ihres Ursprunges ab, d.h. die Lichtintensität steht im umgekehrten Verhältnisse mit dem Quadrate der Entfernung von der Lichtquelle (vgl. §. 3).

Verschiedene Aetherwellen können sich unter sonst gleichen Umständen durch ihre ungleiche Wellenlänge oder durch die ungleiche Schwingungsdauer ihrer Aethertheilchen voneinander unterscheiden. Je kleiner die Wellenlänge oder je kürzer die Schwingungsdauer der zugehörigen Aethertheilchen ist, desto schneller geschehen die Schwingungen der letzteren. Nun ist die Qualität der Lichtstrahlen, d. h. die Farbenempfindung, die sie in uns erregen, nach der Undulationstheorie bedingt durch die Schwingungsdauer der Aethertheilchen. So sind die Schwingungen für die violetten Strahlen am schnellsten, für die äussersten rothen am geringsten, und demgemäss ist die Wellenlänge für diese Strahlen am grössten, für jene am kleinsten. Wir werden später sehen, wie man im Stande war, für die verschiedenen Farbestrahlen die Länge der sie bedingenden Aetherwellen und die Schwingungsdauer der zugehörigen Aethertheilchen oder die Anzahl der von den letztern in der Zeiteinheit vollzogenen Oscillationen zu bestimmen.

So besteht also zwischen Schall und Licht eine gewisse Analogie.

73. Eine Aetherwelle pflanzt sich in einem homogenen Mittel, so lange dieses keine Veränderung erleidet, in der bezeichneten Weise gleichmässig fort; trifft sie aber auf die Grenzebene eines zweiten homogenen Mediums, worin die Dichte oder Elasticität des Aethers eine andere als in jenem Medium ist, so giebt sie durch die Gleichgewichtsstörung des Aethers an der Trennungsebene beider Medien zu zwei Wellensystemen Anlass, von denen sich das eine als sog. reflectirtes Licht in dem vorigen Medium, das andere als gebrochenes Licht in dem zweiten ausbreitet. —

Fig. 73.



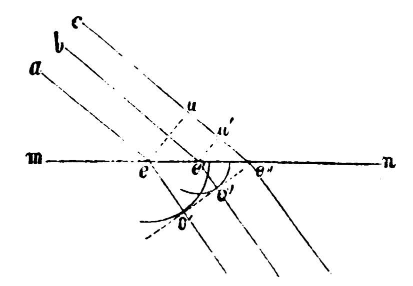
Seien *ae*, *be'* und *ce''* Bestandtheile einer Welle, die von einem so weit entfernten leuchtenden Punkte ausgehen möge, dass die bezeichneten Strahlen als untereinander parallel gelten können. Die Punkte *e*, *e'*, *e''*, in welchen diese Strahlen die Trennungsebene *mn* beider Medien treffen, verhalten sich wie die Mittelpunkte neuer Wellen, insofern die daselbst zur Oscillation angeregten Aethertheilchen eine Wellenbewegung nach allen Seiten veranlassen. Der geometrische Ort der gleichzeitigen Ankunft aller Oscillationen in der Lichtwelle, d. h. die sog. Wellenfläche, lässt sich hier als eine Ebene *eu* betrachten, die in demselben Mittel stets mit sich selbst parallel fortschreitet. Allein diese Wellenfläche wird die verschiedenen Punkte *e*, *e'*, *e''* der Trennungsebene beider Medien nacheinander, also zu verschiedenen Zeiten treffen. Während sie nun von *u* nach *e''* fortschreitet, wird sich von dem bereits getroffenen Punkte *e* eine Welle ausbreiten, deren Halbmesser $ei = ue''$ ist; und während sich dieselbe Wellenebene von *u'* nach *e''* fortpflanzt, geht von dem Punkte *e'* eine sphärische Welle aus, deren Halbmesser $e'i' = u'e''$ ist. Dasselbe gilt von allen zwischen *e'* und *e''* liegenden Punkten, die von der einfallenden Wellenebene *eu* berührt werden. Von allen diesen Punkten gehen sphärische Wellen aus. Die Berührungsebene *e''i'i* aller dieser elementaren Kugelwellen ist nun die reflectirte Welle, d. h. der geometrische Ort der gleichzeitigen Ankunft aller von der Trennungsebene *mn* aus angeregten Oscillationen. Dieselbe schreitet wie die einfallende Wellenebene parallel mit sich selbst fort, während das reflectirte Wellensystem sich in dem bisherigen Medium weiter ausbreitet. Die einzelnen Elementarstrahlen aber, welche dieses Wellensystem

zusammensetzen, unterstützen sich gegenseitig, sofern ihre Aethertheilchen sich sämmtlich in gleichen Schwingungszuständen befinden.

Berücksichtigt man die rechtwinkligen Dreiecke eue'' und eie'', so findet man darin $ue'' = ei$, $ee'' = ee''$, $\angle eue'' = \angle eie''$, und also $\angle ee''u \,(= \angle aem) = \angle e''ei$, d. h. der einfallende und reflectirte Strahl machen mit der reflectirenden (spiegelnden) Ebene mn gleiche Winkel, und daher ist auch, wenn man sich (in e etc.) das Einfallsloth gezogen denkt, der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel.

74. Die sphärischen Wellen, welche von den verschiedenen Punkten der Trennungsebene zweier Medien aus erregt werden, verbreiten sich auch im zweiten Medium. Ist aber die Dichte des Aethers in beiden Medien verschieden, so können sich die Aetherwellen in beiden nicht mit gleichen Geschwindigkeiten fortpflanzen. Gesetzt nun, die Wellenbewegung geschehe im zweiten Medium langsamer als im ersten, so wird sich in jenem während der Zeit,

Fig. 74.



worin die einfallende Wellenebene ue von u nach e'' fortschreitet, vom Punkte e aus eine sphärische Welle verbreiten, deren Halbmesser eo kleiner als ue'' ist. In gleicher Weise breitet sich, während die einfallende Welle von u' bis e'' fortgeht, vom Punkte e' eine sphärische Welle aus, deren Halbmesser $e'o'$ kleiner als $u'e''$ ist, und zwar in demselben Verhältnisse, in welchem eo kleiner als ue'', so dass $eo : e'o' = ue'' : u'e''$.

Man denke sich nun vom Punkte e'' an die in der Figur angedeuteten sphärischen Wellen eine Berührungsebene, senkrecht gegen die Halbmesser eo und $e'o'$ gelegt, so ist dieselbe die Berührungsebene sämmtlicher sphärischer Elementarwellen, welche im zweiten Medium sich verbreiten. Diese Berührungsebene stellt

die gebrochene Wellenebene dar, die sich in dem neuen Medium parallel mit sich selbst fortbewegt.

In den rechtwinkligen Dreiecken eoe'' und eue'' ist nun die Linie ue'' der Sinus des Winkels $e''eu$ und eo der Sinus des Winkels $ee''o$. Die Linien ue'' und eo verhalten sich aber wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Aetherundulationen in beiden Medien; da nun dieses Verhältniss ein constantes ist, so muss es auch das jener Sinus sein. — Stellt man sich bei e das Einfallsloth vor, so ist der Winkel uee'', welchen die einfallende Wellenebene eu mit der brechenden Ebene mn macht, gleich dem Einfallswinkel, und der Winkel $ee''o$, den die gebrochene Wellenebene $e''o$ mit der brechenden Ebene mn einschliesst, gleich dem Brechungswinkel. So resultirt aus der Undulationstheorie das bekannte Brechungsgesetz (§. 13), nach welchem der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels in einem constanten Verhältniss steht. Der Brechungsexponent ist aber hiernach nichts anderes als das Verhältniss der Geschwindigkeiten, mit welchen sich das Licht in verschiedenen Medien fortpflanzt. Ist nun der Brechungsexponent grösser als Eins, so pflanzt das brechende Mittel das Licht langsamer fort als das anfängliche Medium, während das Gegentheil geschieht, falls der Brechungsexponent kleiner als Eins ist. In Uebereinstimmung hiermit erwartet die Undulationstheorie, im Gegensatz zur Emanationstheorie, dass das Licht sich z. B. im Wasser langsamer als im leeren Raume und in der Luft fortpflanze. Der Versuch bestätigte dies (S. 15).

75. Pflanzt sich das Licht in einem Medium langsamer fort als in einem anderen, so ist in jenem die Wellenlänge kürzer als in diesem. Zwischen der Wellenlänge l, der Schwingungsdauer t und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit v des Lichtes haben wir aber die Relation $l = vt$ (§. 72). Sei nun in einem zweiten Medium die Geschwindigkeit des Lichtes $= v'$ und die Wellenlänge $= l'$, so hat man, da die Schwingungsdauer bezüglich desselben Lichtes unverändert bleibt, für dieses Medium $l' = v't$, also mit Rücksicht auf die vorige Gleichung $\frac{l}{l'} = \frac{v}{v'}$, auch $= \frac{\sin x}{\sin y}$, falls x den Einfallswinkel und y den Brechungswinkel bezeichnet. Die Wellenlängen verhalten sich also wie die entsprechenden Geschwindigkeiten des Lichtes in beiden Medien. Und hierauf gestützt kann man auch sagen, dass die Wellenlänge in dem Medium, worin sich

das Licht langsamer fortpflanzt, in dem Verhältnisse verkürzt wird, welches durch den Brechungsexponenten gegeben ist. Je ungleicher aber die Geschwindigkeit in beiden Medien ist, desto grösser wird die Brechung des Lichtes sein.

Nun hat Cauchy*) auf dem Wege der mathematischen Analysis dargethan, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Aetherundulationen, welche einen gewissen Farbestrahl bilden, von der Schwingungsdauer derselben abhängt, auf eine Weise, die durch die Beschaffenheit des Mediums bedingt ist. So werden diejenigen Lichtstrahlen, für welche die zu ihrer Richtung senkrechten Schwingungen des Aethers schneller geschehen, im brechenden Medium langsamer fortgepflanzt als solche, bei denen die Schwingungsdauer grösser ist. Der Brechungswinkel wird aber bei gleichem Einfallswinkel durch das Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Strahlen (von ungleicher Schwingungsdauer) bestimmt, in der Art, dass die Verkürzung der Wellenlängen und darum auch die Brechung des Lichtes um so grösser ist, je langsamer sich dasselbe im brechenden Medium fortpflanzt. Daher werden denn auch die Strahlen, welche das violette Licht bilden, stärker gebrochen als die sog. rothen Strahlen, für welche die Schwingungsdauer und Wellenlänge grösser als für jene ist.

Auf diesem Princip beruht nach der Undulationstheorie die prismatische Zerlegung des weissen, sowie überhaupt des zusammengesetzten Lichtes in seine einzelnen farbigen Bestandtheile. Die Brechbarkeit ist hiernach ausschliesslich durch die Schwingungsdauer bedingt; und die ungleich brechbaren Farbestrahlen, die aus dem weissen Lichte durch ein Prisma hervortreten, sind eben solche, welche sich durch die ungleiche Schwingungsdauer ihrer Aethertheilchen voneinander unterscheiden.

Neuerdings fand nun Baden-Powell auf Grund der analytischen Entwickelungen Cauchy's zwischen dem Brechungsverhältniss n und der Wellenlänge λ die Beziehung $n = C . \frac{\frac{\pi\varrho}{\lambda}}{\sin . \frac{\pi\varrho}{\lambda}}$, worin C und ϱ zwei durch die Natur des brechenden Mediums bestimmte Constanten bedeuten. Diese Formel würde also nach der Undula-

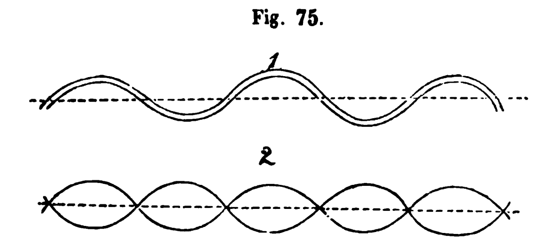
*) Memoire sur la dispersion de la lumiere. Prague 1836.

tionstheorie das Gesetz der Farbenzerstreuung (Dispersion) ausdrücken; und man kann aus ihr, bei gegebenem Werthe von λ und nach Ermittelung der Constanten ϱ und C für irgend eine durchsichtige Substanz das bestimmten Strahlengruppen entsprechende Brechungsverhältniss n berechnen und dasselbe dann mit dem beobachteten Werthe von n vergleichen. Baden-Powell führte diese Vergleichung für eine Reihe von Medien (Flintglas, Crownglas, Terpentinöl und Wasser) durch und kam zu einem befriedigenden Resultate.

76. Zwei Aethertheilchen, die auf dem Wege eines Lichtstrahles liegen, befinden sich (§. 70) in gleichen Schwingungszuständen, wenn sie um eine ganze Wellenlänge oder um ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge auseinander liegen, dagegen in entgegengesetzten Schwingungszuständen, wenn ihre Entfernung eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge beträgt.

Hat man nun zwei homogene Lichtstrahlen, die sich von derselben Lichtquelle aus in paralleler Richtung nebeneinander fortpflanzen, so können ihre Wege von der Lichtquelle bis zu einem bestimmten anderen Punkte gleiche Länge haben, oder es

Fig. 75.



kann der Weg des einen Strahles um eine oder mehrere ganze Wellenlängen grösser als der des anderen sein. In dem einen wie in dem anderen Falle befinden sich die entsprechenden Aethertheilchen beider Strahlen in gleichen Schwingungszuständen (Fig. 75 N. 1). Beträgt dagegen der Wegunterschied beider Strahlen eine halbe oder ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge, so bestehen für die entsprechenden Aethertheilchen dieser Strahlen entgegengesetzte Schwingungszustände (N. 2). Halten nun beide Strahlen dieselbe Richtung ein oder schneiden sie sich in einem gewissen Punkte unter einem sehr spitzen Winkel, so wirken beide Wellen-

systeme in jenen Fällen, wo die Differenz der Wege gleich Null oder eine ganze Wellenlänge oder endlich ein Vielfaches derselben ist, zu demselben Effect zusammen, d. h. das in dem bezeichneten Punkte liegende Aethertheilchen wird durch beide Wellensysteme, die in ihm zusammentreffen, auf dieselbe Weise, d. h. nach derselben Richtung in Bewegung gesetzt, so dass seine Vibrationsintensität doppelt so gross werden kann, als wenn nur die Schwingungen des einen Strahles seine Bewegung bestimmt hätten. Dagegen wird in den anderen Fällen, wo die Differenz der Wege beider Strahlen eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfache derselben beträgt, das in jenem Punkte befindliche Aethertheilchen auf entgegengesetzte Weise angeregt, dergestalt, dass die Vibrationen beider Strahlen das Theilchen in demselben Moment nach entgegengesetzten Richtungen zu treiben suchen. Wenn sich nun diese entgegengesetzten Wirkungen, bei gleicher Intensität, aufheben, so muss das Aethertheilchen in Ruhe bleiben, d. h. es muss hier Dunkelheit entstehen.

Man nennt den eben hervorgehobenen Unterschied zwischen den Wegen zweier homogener Lichtstrahlen kurz ihren Gangunterschied, der seinen Ausdruck findet in der Anzahl der Wellenlängen oder gewisser Theile derselben, sei es nun, dass der eine Strahl einen längeren Weg als der andere von der Lichtquelle aus zurückzulegen hat oder dass er sich langsamer als dieser bewegt. Wir können nun sagen, dass zwei homogene Strahlen, die sich in demselben Sinne fortpflanzen, sich gegenseitig verstärken oder vernichten werden, je nachdem ihr Gangunterschied ein gerades oder ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge beträgt. Diese gegenseitige Einwirkung zweier zusammentreffenden Wellensysteme oder Lichtstrahlen nennt man aber eben die Interferenz des Lichtes.

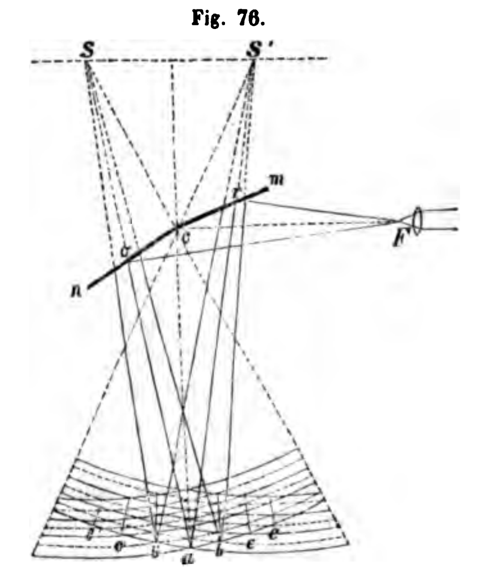
Die Undulationstheorie vermag also in einfacher Weise darzuthun, wie durch das Zusammentreffen mehrerer Lichtstrahlen bald eine grössere Helligkeit, bald aber auch Dunkelheit entstehen kann, während man nach der Emanationstheorie wohl das erstere, nicht aber das letztere begreift.

77. Dass nun eine solche Interferenz des Lichtes, wie es die Undulationstheorie lehrt, wirklich vorkommt, zeigt unter anderen evident der sog. Fresnel'sche Spiegelversuch.

Zwei Metallspiegel oder zwei Stücke von geschliffenem Spiegelglase, deren Rückseite geschwärzt ist, sind so miteinander verbunden, dass sie einen sehr stumpfen Winkel, der nur wenig von 180° verschieden ist, miteinander einschliessen. An ihrer Berührungsgrenze müssen sie genau zusammenpassen, so dass keiner über den anderen hervorragt.

Wenn nun von einem leuchtenden Punkte *F* Strahlen auf die beiden Spiegel *cm* und *cn* fallen, so entstehen zwei einander sehr

Fig. 76.



nahe liegende Spiegelbilder *S*, *S'* desselben, indem die von *F* ausgehenden Strahlen so reflectirt werden, als ob sie von den Punkten *S*, *S'* herkämen, von denen jeder ebenso weit hinter dem betreffenden Spiegel erscheint, als der leuchtende Punkt vor demselben liegt. Die von den Spiegeln reflectirten Strahlen werden sich aber in einer gewissen Entfernung vom Apparate durchschneiden, wodurch sich bei Anwendung von homogenem Lichte (z. B. blauem oder rothem) eine Reihe abwechselnd heller (blauer oder rother) und dunkler Streifen bildet. So erscheint im Punkte *a*, welcher gleich weit von *S* und *S'* entfernt ist, ein heller Streifen, in *b* und *b'* ein dunkler, in *c* und *c'* wieder ein heller, in *e* und *e'* abermals ein dunkler, u. s. f. Bedenken wir nun, dass alle Aethertheilchen, welche irgend einen Strahl, wie *ra* oder *oa*, fortpflanzen,

senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung desselben oscilliren. Denkt man sich jetzt von *S* als Mittelpunkt einen Kreis durch *a* gezogen, so werden alle auf diesem Kreise liegenden Aethertheilchen, wie *a*, *b*, *c*, *e*, ... durch die vom Spiegel *cn* reflectirten Strahlen in denselben Schwingungszustand versetzt, so dass sie alle in demselben Augenblicke nach derselben Richtung oscilliren. Ferner sei von demselben Punkte mit einem kleineren Halbmesser ein dem vorigen paralleler Kreis durch den Punkt *b* gezogen. Beträgt nun der Längenunterschied beider Halbmesser *Sa* und *Sb* gerade eine halbe Wellenlänge, so müssen nach §. 76 alle Aethertheilchen auf dem zweiten Kreise in einer Richtung schwingen, welche derjenigen entgegengesetzt ist, worin sich die Aethertheilchen auf dem ersten Kreise bewegen. Fährt man auf solche Weise fort, um den Punkt *S* Kreisbogen zu ziehen, so beträgt die Entfernung zwischen zwei ausgezogenen Kreisen allemal eine ganze, die Entfernung zwischen einem ausgezogenen und punktirten Kreise aber eine halbe Wellenlänge. Zieht man ebenso auch um den Punkt *S'* Kreise, so erfährt man den Schwingungszustand der Aethertheilchen, welche durch die von dem Spiegel *cm* reflectirten Strahlen angeregt werden.

Liegt nun der Punkt *a* von den Punkten *S* und *S'* in gleicher Entfernung, so sind die Wege der Strahlen *Fra* und *Foa* einander gleich; daher wird das Aethertheilchen in *a* von beiden Wellensystemen, welche diese Strahlen fortpflanzen, nach derselben Richtung in Schwingung versetzt und seine Schwingungsintensität ist doppelt so gross, als wenn es nur durch ein Wellensystem bewegt würde. Das Theilchen in *b* erfährt von dem durch den Spiegel *cn* reflectirten Wellensysteme dieselbe Einwirkung wie das Theilchen in *a*, von dem durch den Spiegel *cm* reflectirten aber die gerade entgegengesetzte. Beide Wirkungen heben sich auf, wodurch hier Dunkelheit entsteht. Aehnliches gilt von den übrigen Punkten. In *c* und *c'*, wie überhaupt in allen Punkten, wo sich zwei ausgezogene oder zwei punktirte Kreise durchschneiden, wird die Lichtintensität vermehrt; denn beide Wellensysteme wirken hier, weil die Differenz ihrer Wege eine ganze oder ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge beträgt, zusammen. Dagegen wirken beide Wellensysteme einander entgegen und es entsteht Dunkelheit in allen Punkten, wo sich ein ausgezogener und punktirter Kreis durchschneiden, weil hier die Differenz der Wege

eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfache derselben beträgt.

Der Versuch zeigt die Lage der hellen und dunklen Stellen so, wie es die Theorie lehrt. Die Reflexion der Strahlen von beiden Spiegeln bewirkt zwischen jenen einen Gangunterschied, der bei ihrem Zusammentreffen Anlass zur Entstehung heller und dunkler Stellen giebt. Dieser Gangunterschied kann aber nur im Sinne der Undulationstheorie Bedeutung haben, nämlich insofern als die zusammentreffenden Lichtstrahlen aus Wellensystemen bestehen, deren Theilchen sich bezüglich der Richtung in demselben oder in einem entgegengesetzten Schwingungszustande befinden; nur hieraus erklärt es sich, dass in den Punkten des Zusammentreffens der reflectirten Strahlen, je nach dem Gangunterschiede, grössere Helligkeit oder Verdunkelung resultirt.

Die Wege der Strahlen von der Lichtquelle f bis zu den Punkten a, b', c', e' etc. sind von ungleicher Länge, ihre Differenz bleibt aber stets dieselbe, nämlich $Sa - Sb' = Sb' - Sc' = Sc' - Se'$. Will man die Wege dieser vom Spiegel cm reflectirten Strahlen numerisch bestimmen, so ist erforderlich, bei gegebenem Neigungswinkel beider Spiegel die Entfernung eines dunklen Streifens vom anderen und die Entfernung der Lichtquelle vom Spiegel zu messen. Durch Rechnung ergiebt sich dann leicht jene Differenz $Sa - Sb'$, etc., die gleich einer halben Wellenlänge ist.

Als man die Reihe der hellen und dunklen Streifen, die man Interferenzstreifen nennt, durch verschiedene homogene Lichtsorten entstehen liess, überzeugte man sich bald, dass die Breite solcher Streifen für rothes Licht am grössten, für violettes dagegen am kleinsten ist. Und daraus musste man schliessen, dass die Wellenlänge für die sog. rothen Strahlen grösser als für die sog. violetten ist. — Bei Anwendung von weissem Lichte bemerkt man um die Streifen farbige Säume, die mit der Breite der Streifen an Deutlichkeit gewinnen. Nun ist nicht zu verkennen, dass das Interferenzphänomen für weisses Licht aus allen jenen Interferenzerscheinungen resultiren muss, welche die einzelnen homogenen Farbestrahlen für sich geben. So bemerkt man in der Mitte der ganzen Erscheinung, wo Strahlen von allen Farben zusammentreffen, einen weissen Streifen. Die übrigen Streifen können aber weder rein weiss noch rein schwarz erscheinen, weil die hellen und dunklen Streifen für die verschiedenen homogenen

Farbestrahlen nicht genau an dieselben Stellen fallen, daher diese Streifen gesonderte farbige Säume zeigen müssen.

Als Lichtquelle benutzte man bei dem obigen Spiegelversuche das Sonnenbildchen im Brennpunkte einer Linse von kurzer Brennweite oder das auf einem Metallknopfe gebildete Sonnenbild. Noch zweckmässiger erwies sich jedoch eine Lichtlinie, die man im Laden eines dunklen Zimmers mittelst eines schmalen vertikalen Spaltes hervorbrachte, indem man mit Hülfe eines vor dem Laden angebrachten Spiegels die Lichtstrahlen in horizontaler Richtung eintreten liess. Fresnel benutzte zur Darstellung einer Lichtlinie eine Cylinderlinse, welche aus zwei Cylindersegmenten zusammengesetzt war. Anstatt des Brennpunktes der gewöhnlichen Linse hat man hier eine leuchtende Brennlinie. Die Interferenzstreifen selbst beobachtet man durch eine Loupe.

78. Auf das besprochene Princip der Interferenz zusammentreffender Wellensysteme lassen sich nun auch leicht die sog. Beugungserscheinungen des Lichtes zurückführen. Zuvörderst erwähnen wir jedoch noch einen Versuch, der einige Interferenzphänomene des Lichtes in einfachster Weise zur Darstellung bringt, und schon in Grimaldi *) den Gedanken einer wellenartigen Fortpflanzung des Lichtes anregte. Man lasse nämlich durch zwei feine, nahe beieinander stehende Oeffnungen Sonnenstrahlen in ein dunkles Zimmer dringen und fange sie auf einem weissen Schirme auf. Alsdann bemerkt man auf dem letzteren zwei helle Kreise, die sich bei einer gewissen Entfernung des Schirmes von den Oeffnungen theilweise decken. Solche Stellen nun, welche von beiden Oeffnungen zugleich Licht empfangen, erscheinen zwar der Erwartung gemäss heller als andere Stellen, denen nur von einer Oeffnung Licht zukommt, aber an der Grenze des doppelt beleuchteten Raumes bemerkt man auch dunkle Streifen, obgleich die Stellen, wo sie hinfallen, noch von beiden Oeffnungen Licht erhalten. Diese Streifen erscheinen viel dunkler als jene Stellen, welche nur von einer Oeffnung Licht empfangen, und es folgt daraus, dass durch Hinzukommen von Licht zu Licht Dunkelheit entstehen kann. Wird eine Oeffnung geschlossen, damit nur durch die andere Licht auf den Schirm fällt, so verschwinden alsbald die dunklen Streifen. — Hiernach untersuchte Young die hellen



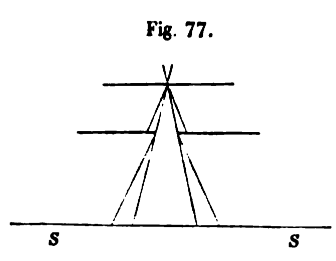
*) Physico-mathesis de lumine, caloribus et iride. Bononiae 1665.

und dunklen Streifen, welche hinter einem schmalen Körper, auf den ein leuchtender Punkt oder eine leuchtende Linie Strahlen sendet, entstehen. Auch er sah diese Strahlen sofort verschwinden, wenn man das Licht an der einen Seite des schmalen Körpers vorbeizugehen hinderte. So führte dieser Versuch zu demselben Resultate wie jener, nämlich, dass Lichtstrahlen, welche nahe in derselben Richtung fortgehen, sich im Falle des Zusammentreffens je nach den Umständen gegenseitig verstärken oder vernichten können. Nimmt man nun eine Fortpflanzung des Lichtes durch Wellenbewegung eines elastischen Fluidums an, so begreift man wohl, dass zwei Lichtstrahlen, welche in einem Punkte hinter dem schmalen Körper zusammentreffen, sich gegenseitig verstärken oder vernichten müssen, je nachdem sie daselbst mit gleichen oder entgegengesetzten Schwingungszuständen anlangen. Das Letztere hängt aber von dem Unterschiede der Wege ab, welche die beiden Strahlen von der Lichtquelle bis zu ihrem Durchschnittspunkte durchlaufen.

Wenn man auf einen schmalen Körper, etwa auf eine Stricknadel, Sonnenstrahlen durch eine feine Oeffnung oder durch eine enge, dem Körper parallele Spalte im Fensterladen eines verfinsterten Zimmers fallen lässt, so erscheint der Schatten dieses Körpers breiter, als er unter Voraussetzung einer geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes (an den Rändern des Körpers vorbei) sein könnte. In der Mitte des Schattenbildes, wo man die grösste Dunkelheit erwartet, bemerkt man einen hellen Streifen, zu beiden Seiten desselben dunkle Linien und weiterhin auch einige farbige Säume. Diese Streifen oder Linien sind mit dem Schatten des Körpers, in unserem Beispiele mit der Richtung der Stricknadel, parallel.

Lässt man das durch eine feine Oeffnung des Fensterladens dringende Licht durch eine zweite enge Oeffnung gehen, so sieht man auf einem in passender Entfernung angebrachten weissen Schirme SS, falls diese Oeffnung rund ist, einen weissen runden Fleck, welcher von mehreren Ringen umgeben ist, die viel breiter erscheinen, als es bei einem gewöhnlichen geradlinigen Fortgange aller durch die Oeffnung dringenden Strahlen der Fall sein

Fig. 77.

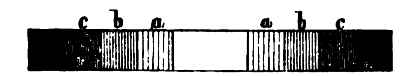


könnte. Bei Anwendung einer schmalen Spalte anstatt der runden Oeffnung sieht man abwechselnd helle und dunkle Streifen, welche mit der Spalte parallel sind.

Da es nun den Anschein hatte, als ob diese Erscheinungen Folge einer Ablenkung der Lichtstrahlen von ihrer geraden Richtung seien, in dem Augenblick, wo sie an den Rändern der Körper vorübergehen, so nannte man dieselben und nennt sie noch jetzt die **Beugung (Inflexion)** des Lichtes. Grimaldi wählte zu ihrer Bezeichnung das Wort **Diffraction** (Verbreitung, Zerstreuung), von dem man ebenfalls noch Gebrauch macht. Alle diese Erscheinungen lassen sich aber, wie bereits oben angedeutet, auf das Princip der Interferenz der Lichtstrahlen zurückführen.

79. Sehr schön kann man die Beugungserscheinung, welche eine schmale Spalte gewährt, wahrnehmen, wenn man nach Fraunhofer ein Fernrohr auf die Spalte im Fensterladen richtet und vor dem Objectiv des Rohres die zweite Spalte anbringt. Sieht man durch das Ocular nach der Lichtquelle hin, so bemerkt man in der Mitte des Gesichtsfeldes einen weissen Streifen, welcher gegen seine beiden Enden zu gelb und roth erscheint. Seine Höhe ist

Fig. 78.



gleich der scheinbaren Höhe der Lichtlinie, während seine Breite um so bedeutender, je enger die Spalte vor dem Objectiv ist. Zu beiden Seiten dieses Streifens gewahrt man eine Reihe von Farbenbildern *a*, *b*, *c*, welche allmälig ineinander übergehen und immer lichtschwächer werden. Das Farbenbild *a* ist am lebhaftesten und enthält fast alle prismatischen Farben, dergestalt, dass sich die violette Farbe an dem Ende befindet, welches dem weissen Streifen zugekehrt ist, die rothe aber am entgegengesetzten Ende. Bei den folgenden Bildern sind aber nicht alle Farben, die man sonst im Sonnenspectrum wahrnimmt, vorhanden. So fehlt beim zweiten Violett, beim dritten Blau und Violett, u. s. w. Die einzelnen Farbenbilder erscheinen um so breiter, je enger die Spalte vor dem Objectiv des Fernrohrs ist.

Bringt man vor der Spalte im Fensterladen ein Glas an, das nur gleichartiges Licht, z. B. rothes, durchlässt, so sieht man in



der Mitte einen hellen (rothen) Streifen, und zu dessen beiden Seiten andere (rothe), welche allmälig an Helligkeit abnehmen. Sämmtliche Streifen sind durch dunkle Zwischenräume voneinander getrennt. Wendet man auf dieselbe Weise verschiedenfarbige Gläser an, so sieht man im Ganzen dieselbe Erscheinung, jedoch von verschiedener Ausdehnung. Für rothes Licht sind die Streifen am breitesten und stehen am weitesten voneinander ab. Für die übrigen Farben werden sie allmälig schmäler, während sie gleichzeitig einander näher rücken, so dass die ganze Erscheinung für violettes Licht die geringste Ausdehnung hat. — Da also die hellen und dunklen Streifen für die einzelnen homogenen Farben nicht an denselben Stellen des ganzen Beugungsbildes auftreten, so muss dieses letztere bei Anwendung von weissem Lichte, das alle Spectralfarben in sich vereinigt enthält, eine Reihe farbiger Bilder darbieten.

Wenn man vor dem Objectiv des Fernrohres zwei gleich nahe nebeneinander befindliche Spalten anbringt, so werden die oben betrachteten Streifen in mehrere kleinere abgetheilt, während sonst die ganze Erscheinung der ähnlich bleibt, die man bei einer einzigen Spalte erhält. Nach Fraunhofer nennt man die Streifen, welche bei einer Spalte entstehen, Spectra erster Ordnung, und die durch zwei Spalten entstandenen: Spectra zweiter Ordnung. Durch Hinzufügung einer dritten Spalte wird die Anzahl der Streifen noch grösser und man erhält ein Spectrum dritter Ordnung, u. s. f. Bei Anwendung von weissem Lichte nimmt dann namentlich in der Mitte des Gesichtsfeldes die Anzahl der farbigen Streifen zu.

Befindet sich vor dem Objectiv des Fernrohres ein Gitter mit sehr vielen kleinen Oeffnungen, durch welche weisses Licht fällt, so bemerkt man zu beiden Seiten der weissen Mittellinie eine grosse Anzahl symmetrischer Streifen, die zum Theil ganz homogene Farben, wie man sie durch ein gutes Prisma erhalten kann, darbieten.

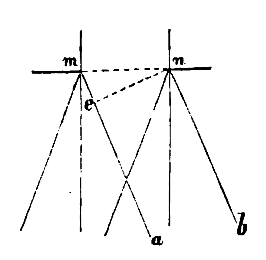
Sehr prachtvolle, symmetrische Farbenerscheinungen werden ferner erhalten, wenn man vor das Objectiv des Fernrohres mehrere runde oder eckige Oeffnungen (in gewisser Anordnung) bringt.*)

*) Vgl. über dies Alles Fraunhofer: Denkschriften der königl. baierischen Akademie der Wissensch., für 1821 u. 1822. Bd. VIII.; Gilbert's Ann. Bd. LXXIII.

Aber auch ohne Fernrohr und ohne dass man sich in einem dunklen Zimmer befindet, kann man derartige Beugungserscheinungen nach Schwerd beobachten, wenn man die Spaltöffnungen oder ein feines Gitter vor das Auge hält und nach einem Lichtpunkte oder nach einer Lichtlinie hinsieht. Als Lichtpunkt kann man das Spiegelbildchen der Sonne benutzen, welches auf einem polirten Metallknopfe, auf einer gefüllten Thermometerkugel oder an der convexen Fläche eines geschwärzten Uhrglases entsteht, während sich eine leuchtende Linie durch Spiegelung einer Stricknadel, einer Glasröhre u. dergl. im Sonnenlichte erhalten lässt.

80. Möge nun von einem entfernten leuchtenden Punkte ein Bündel homogener und zu einander paralleler Lichtstrahlen senkrecht durch eine enge Spalte *mn* dringen; dann werden die einfallenden Aetherwellen die Oeffnung in übereinstimmenden Phasen treffen, und sich jenseits derselben mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen. Allein auch seitwärts von der Oeffnung wird sich die Wellenbewegung verbreiten, insfern jedes Aethertheilchen innerhalb der ersteren zu einem Mittelpunkte neuer Wellen wird. Da nun alle Strahlen, die sich senkrecht zur Oeffnung fortpflanzen, in übereinstimmenden Phasen schwingen, so werden sich dieselben gegenseitig unterstützen, falls sie im Brennpunkte einer Linse oder in einem Punkte der Netzhaut zusammentreffen.

Fig. 79.



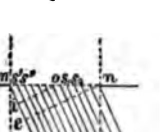
Die Schwingungsintensität, die sie zusammen bewirken, wird dann gleich der Summe der Schwingungsintensitäten aller einzelnen Strahlen sein. Dagegen muss es unter den sich seitwärts verbreitenden Aetherwellen Strahlen geben, die wegen ihres Gangunterschiedes theils in übereinstimmenden, theils in entgegengesetzten Phasen schwingen. In obenstehender Figur seien *ma* und *nb* die Randstrahlen eines seitwärts ausfahrenden Lichtbündels. Beträgt nun der Gangunterschied *ne* dieser Strahlen, den man erhält, wenn man sich vom Punkte *n* eine Senkrechte auf *ma* gezogen denkt, eine halbe Wellenlänge, so befinden sich beide Strahlen in entgegengesetzten Schwingungszuständen und müssen

S. 287, Bd. LXXIV. S. 337; — sowie auch Herschel: On Light p. 491. §. 766; Poggend. Ann. Bd. XXIII. S. 281.

sich daher in ihren Wirkungen aufheben, wenn sie irgendwo zusammentreffen, während die zwischen ihnen gelegenen Strahlen noch wirksam bleiben. So wird also seitlich von dem Bilde, welches die senkrecht durchgehenden Strahlen verursachen, eine Stelle geschwächter Lichtintensität entstehen.

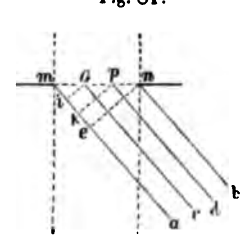
Zwischen den Randstrahlen eines anderen seitwärts ausfahrenden Lichtbündels wird der Gangunterschied *me* eine ganze Wellenlänge betragen. Denkt man sich in diesem Falle das ganze Bündel durch die ausgezogenen Strahlen in gleiche Abtheilungen, also durch *oc* in zwei Hälften getheilt, so ist der Gangunterschied *mi* der Strahlen *me* und *oc* eine halbe Wellenlänge. Diese Strahlen werden sich also vernichten, und dasselbe gilt auch von den Strahlen $s's'$ und $s_1 s_1$, sowie von $s''s''$ und $s_2 s_2$, u. s. f. Daher wird an dem Orte des Gesammtbildes, wo die Strahlen des bezeichneten Bündels sich vereinigen, eine dunkle Stelle entstehen.

Fig. 80.



Beträgt der Gangunterschied zwischen den Randstrahlen *ma* und *nb* eines andern gebeugten Lichtbündels drei halbe Wellenlängen, so sei dasselbe durch die Strahlen *oc* und *pd* in drei gleiche Theile getheilt. Nun ist der Gangunterschied zwischen den Strahlen *ma* und *oc*, wie zwischen *oc* und *pd*, und endlich auch zwischen *pd* und *nb* gleich einer halben Wellenlänge, der zwischen *ma* und *pd* oder zwischen *oc* und *nb* aber gleich einer ganzen Wellenlänge. Mit Rücksicht auf den vorhergehenden Fall folgt daher, dass im gegenwärtigen wenigstens zwei Drittel aller Strahlen sich gegenseitig aufheben, während etwa noch ein Drittel wirksam bleibt. So wird an der Stelle des Gesammtbildes, wo diese Strahlen sich vereinigen, zwar keine volle Dunkelheit, aber doch eine geringere Lichtintensität entstehen als an dem Orte, wo der Gangunterschied der Randstrahlen, wie bei dem zuerst betrachteten seitlichen Lichtbündel, eine halbe Wellenlänge beträgt.

Fig. 81.



Bei einem Gangunterschiede der Randstrahlen von vier halben Wellenlängen findet wieder eine vollkommene Vernichtung

aller dazu gehörigen Strahlen statt, wie man leicht findet, wenn man sich das ganze Bündel in vier gleiche Theile zerlegt denkt. Beträgt der Gangunterschied der Randstrahlen fünf halbe Wellenlängen, so bleibt vom ganzen Bündel der fünfte Theil wirksam, während die vier übrigen Theile, wegen des Gegensatzes im Schwingungszustande ihrer Strahlen, sich gegenseitig vernichten.

Auf diesem Wege fortfahrend ergiebt sich leicht, dass die Gesammtwirkung der Strahlen eines gebeugten Lichtbündels allemal gleich Null ist, wenn der Gangunterschied der Randstrahlen ein gerades Vielfache einer halben Wellenlänge beträgt, dass aber immer noch ein Theil der Strahlen wirksam bleibt, wenn der Gangunterschied ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge ist.

81. Auf solche Weise entstehen nun jene hellen und dunklen Streifen, die man bei homogenem Lichte vermittelst einer schmalen vertikalen Spalte wahrnimmt, wobei nur noch zu erinnern, dass die Beugung der Lichtstrahlen, d. h. die Ausbreitung der Aetherwellen zu beiden Seiten der Oeffnung geschieht (Fig. 79). Mit der Entfernung von der Mitte nehmen die hellen Streifen, wie oben gezeigt, an Lichtstärke ab.

Dringt weisses Licht durch die Spalte, so giebt jede homogene Farbe desselben ihr eigenes Spectrum, welches, wie uns schon bekannt, für die rothen Strahlen am grössten, für die violetten am kleinsten ist. Da nun die hellen und dunklen Streifen dieser einzelnen Spectra nicht zusammenfallen, wohl aber zum Theil die hellen Streifen des einen in die dunklen des anderen fallen können, so werden überall Farbentöne ohne Stellen völliger Dunkelheit auftreten, und nur in der Mitte wird man eine Mischung aller Farben, also Weiss wahrnehmen.

Nach dem angedeuteten Princip erklären sich auch die Beugungsspectra mehrerer nebeneinander befindlichen Spalten. Ueberhaupt lässt sich die Gestalt des Spectrums für irgend eine enge Oeffnung oder eine beliebige Anzahl derselben vorausbestimmen. *)

Auf ähnliche Weise ergeben sich die Farbenspiele, welche man wahrnimmt, wenn man durch ein Stück Mousselin, Flor,

*) Vgl. Schwerd: Die Beugungserscheinungen aus den Fundamentalgesetzen der Undulationstheorie analytisch entwickelt, Mannheim 1835. — Radicke, Handbuch der Optik, Berlin 1839. — Knochenhauer, die Undulationstheorie des Lichtes, Berlin 1839. — Wilde, Poggend. Ann. Bd. LXXIX. S. 75 u. 202.

Drahttuch, Seidenband, durch ein Spinnengewebe oder durch den Bart einer Vogelfeder nach einem Lichtpunkte hinsieht. Ebenso das Farbenspiel an den feinen Haaren der Hüte, wenn man durch dieselben die Sonne betrachtet, oder wenn man durch eine angehauchte oder mit Semen lycopodii (Hexenmehl) bestreute Glasplatte nach einer Kerzenflamme sieht, u. s. w. Auch das Farbenspiel feingestreifter Oberflächen im reflectirten Lichte, wie z. B. das der Barton'schen Irisknöpfe, gehört hierher, wenigstens insofern, als dasselbe seinen Grund in dem Gangunterschiede und demgemäss in der Interferenz der von solchen Oberflächen reflectirten Lichtstrahlen hat. Dieselben Farben entstehen auch, wenn man die Oberflächen dieser Körper in Wachs abdrückt, und den Abdruck unter sonst gleichen Umständen betrachtet. Diese Erscheinungen sind also, wie im Grunde alle Beugungs- oder Interferenzerscheinungen, von der rein materiellen Beschaffenheit der Körper unabhängig und nur durch die Gestalt der Oberfläche (resp. der Oeffnung) bedingt.

Ebenfalls eine Beugungserscheinung sind die kleineren Höfe, die man nicht selten um Sonne, Mond und die grösseren Sterne wahrnimmt. Diese Höfe erscheinen zuweilen nach aussen roth gefärbt, und haben bald einen grösseren, bald einen kleineren Durchmesser. Dieselben erklären sich aus einer Beugung der Lichtstrahlen, während die letzteren an den Rändern der in der Atmosphäre schwebenden Dunstkügelchen vorübergehen. Diese Beugung geschieht hier ebenso, als wenn das Licht durch eine Oeffnung geht, die mit den Kügelchen gleichen Durchmesser hat. Bringt man nach Fraunhofer*) vor das Objectiv eines Fernrohres sehr viele, gleich grosse Glaskügelchen und lässt man auf diese durch eine kleine runde Oeffnung Lichtstrahlen fallen, so sieht man im Gesichtsfelde des Fernrohres farbige Ringe, die mit jenen Höfen durchaus Aehnlichkeit haben und um so grösser erscheinen, je kleiner die Glaskügelchen sind. So werden auch die Durchmesser der Höfe um so grösser ausfallen, je kleiner die Dunstkügelchen in der Atmosphäre sind. Auch haben dieselben Höfe eine auffallende Aehnlichkeit mit der Beugungserscheinung, die man an einer Kerzenflamme wahrnimmt, wenn man durch eine

*) Theorie der Höfe und Nebensonnen in Schuhmacher's astronom. Abhandl. Bd. III. S. 56.

angehauchte oder mit semen lycopodii bestreute Glasplatte nach einer Kerzenflamme blickt. In ganz ähnlicher Weise wie hier die Staubtheilchen und dort die Glaskügelchen wirken nun die in der Atmosphäre schwebenden Dunstbläschen, wenn die Lichtstrahlen an ihren Rändern vorübergehen.

82. Eben wohl zu den Interferenzerscheinungen gehören die Farbenspiele, welche dünne Plättchen (Lamellen) durchsichtiger Substanzen im reflectirten und durchgelassenen Lichte zeigen. Solche Plättchen verrathen, dem Sonnenlichte ausgesetzt, eine sehr lebhafte Färbung, die sowohl von der Dicke derselben als auch von dem Einfallswinkel des Lichtes abhängt. Man bemerkt diese Färbung sehr auffallend an Seifenblasen, auch an dünnen auf Wasser schwimmenden Oelschichten, ebenso an dünnen Luftschichten in den Sprüngen der Krystalle oder dicker Glasmassen, an dünnen Fischschuppen, Collodionhäutchen, am polirten Stahl, wenn sich auf demselben bei hoher Temperatur dünne Häutchen durch Oxydation bilden, u. s. w.

Die empirischen Gesetze dieser Farbenerscheinungen wurden zuerst von Newton*) genauer untersucht. Derselbe stellte eine dünne Luftlamelle von wechselnder Dicke unter anderem dadurch her, dass er eine planconvexe Linse von grossem Halbmesser mit



Fig. 82.



ihrer krummen Oberfläche auf eine Glastafel legte und beide Gläser an ihrem Berührungspunkte gegeneinander presste. Dann sah er da, wo die Linse die Glasplatte berührte, einen schwarzen Fleck und um diesen mehrere concentrische Farbenringe, die nach aussen hin immer schmäler und matter wurden. Jeder Ring zeigte eine bestimmte concentrische Farbenfolge, und zwar von der Mitte aus in nachstehender Ordnung: 1. Ring: Schwarz, Blau, Weiss, Gelb, Orange, Roth. 2. Ring: Violett, Indigblau, Blau, Grün, Gelb, Orange, Roth. 3. Ring: Purpur, Indigblau, Blau, Grün, Gelb,

*) Optice lib. II. Pars I. u. II.

Roth. 4. Ring: Bläulichgrün, Grün, Roth. 5. Ring: Grünlichblau, Blassroth. 6. Ring: Grünlichblau, Röthlichweiss. 7. Ring: sehr blasses Grünlichblau, schwach Röthlichweiss.

Wendet man statt des weissen Lichtes homogenes an, so sieht man nur abwechselnd helle und dunkle Ringe, deren Durchmesser Newton mit grosser Genauigkeit gemessen hat. Für reflectirtes Licht verhalten sich die Quadrate der Halbmesser der hellen Ringe, vom hellsten an gerechnet, wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7, ..., während bezüglich der dunklen Ringe die Quadrate der Halbmesser im Verhältnisse der geraden Zahlen 2, 4, 6, 8, ... stehen. Wird die Erscheinung mittelst durchgelassenen Lichtes bewirkt, so bilden sich an den Stellen, wo sich im reflectirten Lichte helle Ringe zeigen, dunkle, und umgekehrt. Für verschiedene homogene Farben sind aber die Durchmesser der hellen und dunklen Ringe von verschiedener Grösse, und zwar für die violetten Strahlen am kleinsten, für die rothen am grössten. Daher muss denn auch der Abstand zwischen beiden Gläsern oder die Dicke der Luftschicht, welche der Mitte eines bestimmten Ringes entspricht, für verschiedene Farben ungleich sein. Und man bemerkt, dass der Durchmesser eines Ringes von irgend einer Ordnung um so kleiner ist, je brechbarer die Farbestrahlen sind, die ihn erzeugen. Bringt man endlich in den Raum zwischen beiden Gläsern einen Tropfen Flüssigkeit, z. B. Wasser, Weingeist, etc., so bildet derselbe um den Berührungspunkt der Gläser gewissermassen concentrische Schichten, welche nach aussen hin an Dicke zunehmen. Nun gewähren verschiedene durchsichtige Flüssigkeiten zwar im Ganzen dieselbe Erscheinung, wie sie oben näher bezeichnet ist, allein die Dicke der Schicht, welche einem bestimmten Ringe entspricht, ist nach der Natur der Flüssigkeit veränderlich. Als Newton die Durchmesser der Ringe für verschiedene Flüssigkeiten einer genauen Messung unterwarf, fand sich, dass der Durchmesser eines Ringes unter sonst gleichen Umständen um so kleiner wird, je mehr das Brechungsvermögen der Flüssigkeit zunimmt.

Man kann die Newton'schen Farbenringe auch bequem hervorbringen, wenn man zwei Scheiben von dünnem Tafelglase, etwa 6—8 Zoll im Durchmesser, nimmt, und die eine auf einer Seite ringsum einen Viertelzoll breit mit Blattgold belegt, und beide so aufeinander legt, dass der Goldring dazwischen kommt. Presst man sie dann in der Mitte, etwa mittelst einer Schraube, zusammen,

so kommen sie hier miteinander in Berührung, während sie rings am Rande um die Dicke eines Goldblattes getrennt bleiben. Indessen hat Jerichau*) zur bequemen Darstellung dieser Ringe einen besonderen Apparat unter dem Namen Gyreidoskop (*γῦρος*, Kreis, *εἶδος*, Gestalt, *σκοπέω*, ich sehe) construirt, der von E. Wilde**) zum Behufe messender Beobachtungen eine wesentliche Verbesserung erfahren hat und um dessentwillen von ihm Gyreidometer genannt wird.

83. Was die Erklärung dieser Farbenringe betrifft, so gab zuerst Hooke***) eine Andeutung im Geiste der Undulationstheorie, die Th. Young****) zum Princip der Interferenz und damit zu einer verständlicheren Deutung dieser Erscheinungen führte, bis endlich Fresnel †) die Theorie derselben zu einer gewissen Vollendung brachte ††).

Sei nun zwischen den parallelen Glasplatten *mm'* und *nn'* eine dünne Luftschicht vorhanden, und falle auf dieselbe ein Bündel *ab* paralleler, homogener Lichtstrahlen. Dann wird dasselbe bei dem Uebergange aus dem Glase in die Luftschicht zum Theil nach *br* reflectirt, während ein anderer Theil innerhalb der Luftschicht eine Brechung nach *bc* und bei *c* eine Spaltung erfährt, der Art, dass ein Theil nach der Richtung *cd* austritt und ein anderer in der Richtung *ck* reflectirt wird. Dieser letztere Antheil wird dann bei *k* zum Theil in der Richtung *kr'*, parallel zu *br*, ausfahren, und zum Theil nach der Richtung *ke* reflectirt werden, um hier in der Richtung *ed'*, parallel mit *cd*, auszutreten. Nun wird sowohl zwischen den Strahlen *br* und *kr'*, als auch zwischen den durchgelassenen Strahlen *cd* und *ed'* ein

Fig. 83.

*) Poggend. Ann. Bd. LVI. S. 139.

**) Poggend. Ann. Bd. LXXXI. S. 264.

***) Micrographia. London 1667. p. 65.

****) On the Theory of Light and Colours in Philos. Transact. of the Society of London. 1802. p. 37.

†) Annal. de Chim. et Phys., 1823. T. XXIII. p. 129.

††) Vgl. auch Poisson: Ann. de Chim. et Phys. 1823. T. XXII. p. 337. — J. Herschel: Vom Lichte, aus d. Engl. von Schmidt, S. 334. — Airy: Mathematical Tracts (2. edit.), p. 301. — Radicke: Handbuch der Optik, Th. II. S. 95. — Knochenhauer: Die Undulationstheorie des Lichtes, S. 88. — E. Wilde: Poggend. Ann. Bd. LXXXII. S. 18.

gewisser Gangunterschied bestehen, um dessentwillen diese Strahlen, im Falle ihres Zusammentreffens, zur Interferenz gelangen, d. h. sich je nach ihren Schwingungszuständen gegenseitig verstärken oder vernichten müssen. Betrachten wir zunächst die Strahlen br und kr', so besteht zwischen ihnen einmal der von der Dicke des Plättchens abhängige Gangunterschied $bc + ck$ und dann noch der einer halben Wellenlänge. Der letztere Unterschied rührt aber daher, dass zwei Strahlen, von denen der eine bei dem Uebergange des Lichtes aus einem stärker brechenden Medium in ein schwächer brechendes und der andere beim Uebergange des Lichtes aus dem letztgenannten Medium in das erstere reflectirt ist, um eine halbe Wellenlänge differiren. Dies passt auf unseren Fall, wo eine dünne Luftschicht zwischen zwei Glasflächen enthalten ist, also zwei Medien von ungleicher Dichte und verschiedenem Brechungsvermögen aneinander grenzen. Die eine Reflexion geschieht an der äusseren (oberen) Grenze der Luftschicht, die andere an der inneren Grenze derselben oder an der unteren Glasfläche. Indem nun bei der Reflexion einer Aetherwelle an der einen Grenze der dünnen Schicht, der Natur der Wellenbewegung gemäss, eine Umkehr der Aetherschwingungen in Bezug auf ihre Richtung an der anderen eintritt, wird zwischen den beiden interferirenden Strahlen br und kr' eine Differenz bewirkt, die dem Betrage einer halben Wellenlänge äquivalent ist.

84. Gesetzt nun ferner, das einfallende Bündel ab weiche nur wenig von der Senkrechten vv' ab, so können wir den Gangunterschied $bc + ck$ der Strahlen br und kr', wenn man die Dicke der Luftschicht durch δ bezeichnet, $= \delta + \delta = 2\delta$ annehmen, und den gesammten Gangunterschied dieser Strahlen nach dem Vorstehenden $= 2\delta + \frac{1}{2}\lambda$, falls λ die Länge einer Aetherwelle ausdrückt. Es wird also jetzt von der Dicke δ der Luftschicht abhängen, ob die beiden Strahlen br und kr' sich gegenseitig unterstützen oder vernichten. Sei $\delta = \frac{1}{4}\lambda$, so ist $2\delta + \frac{1}{2}\lambda = \frac{2}{2}\lambda = \lambda$, demnach der Gangunterschied beider interferirenden Strahlen gleich einer ganzen Wellenlänge. In diesem Falle befinden sich beide Strahlen in übereinstimmenden Schwingungszuständen und werden sich gegenseitig verstärken. Ist $\delta = \frac{2}{4}\lambda = \frac{1}{2}\lambda$, so hat man $2\delta + \frac{1}{2}\lambda = \frac{3}{2}\lambda$. Wenn aber zwei Strahlen um ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge differiren, so befinden sie sich in ent-

gegengesetzten Schwingungszuständen. Die Strahlen br und kr' werden sich also in diesem Falle gegenseitig vernichten.

Bedenkt man nun überhaupt, dass zwei Strahlen sich gegenseitig verstärken, wenn sie um eine ganze Wellenlänge oder um ein Vielfaches derselben differiren, dass sie sich dagegen vernichten, wenn ihr Gangunterschied eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge beträgt (§. 76), so überzeugt man sich, auf obige Weise fortfahrend, sehr leicht, dass ein Maximum von Licht, d. h. eine hellste Stelle entstehen wird, wenn $\delta = \frac{1}{4}\lambda, = \frac{3}{4}\lambda, = \frac{5}{4}\lambda, = \frac{7}{4}\lambda, \ldots$, dagegen ein Minimum von Licht oder eine dunkle Stelle, falls $\delta = \frac{2}{4}\lambda, = \frac{4}{4}\lambda, = \frac{6}{4}\lambda, = \frac{8}{4}\lambda, \ldots$

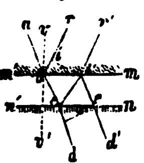
D. h. in Worten: Ein dünnes Plättchen einer durchsichtigen Substanz, das wie die Luftschicht in dem obigen Newton'schen Versuche (§. 82), an Dicke allmälig zunimmt, wird im reflectirten Lichte abwechselnd hell und dunkel erscheinen, je nachdem die Dicke desselben eine ungerade oder eine gerade Anzahl von Viertelwellenlängen beträgt.

Berühren sich die Gläser unmittelbar, in der Art, dass die Dicke der zwischen ihnen befindlichen Luftschicht als unendlich klein anzunehmen ist, so fällt jene Umkehr in der Richtung der Aetherschwingungen und der hierdurch bedingte Gangunterschied der beiden interferirenden Lichtstrahlen fort, weil nämlich in diesem Falle gar keine Reflexion an der unteren Grenzfläche der Schicht vorkommt. Und daher ist auch die Mitte des Ringsystems hell, wenn die Gläser sich berühren. Presst man sie aber stark aneinander, so erscheint in der Mitte ein schwarzer Fleck, weil sie hier das Licht einfach hindurchlassen. Nach E. Wilde verhält es sich damit in ganz ähnlicher Weise wie mit der Stelle eines Spiegels, an der die Folie fehlt. Eine solche Stelle erscheint wegen des hier durchgelassenen Lichtes gegen den übrigen hellen Spiegelhintergrund schwarz, ebenso wie der innere auch noch so helle Raum eines Zimmers, durch eine Oeffnung von Aussen her betrachtet, um so dunkler sich zeigt, je kleiner die Oeffnung ist. Die Schwärze jenes Centralfleckes entsteht also nicht durch eine Interferenz der Lichtstrahlen.

85. Wenn das Lichtbündel ab unter einem grössern Winkel mit dem Einfallslothe auffällt, so werden die Ringe grösser, und der Gangunterschiad $bc + ck$ ist auch nicht mehr $= 2\delta$, d. h.

gleich der doppelten Dicke der dünnen Schicht. Denkt man sich von k auf br die Senkrechte ki gezogen, so besteht zwischen den Strahlen br und kr' der Gangunterschied $bc + ck - bi$, wo bi im Falle einer dünnen Luftschicht zwischen zwei Glasplatten im Glase liegt. Nun lässt sich aber die Wellenlänge des Lichtes im Glase immer auf die in der Luft zurückführen, sobald der Brechungsexponent aus Luft in Glas bekannt ist. Dieser Exponent ist $= \frac{3}{2}$, d. h. die Geschwindigkeit des Lichtes in der Luft verhält sich zu der im Glase wie 3 : 2. Bezeichnet man denselben allgemein durch n, die Wellenlänge in der Luft durch λ, und die im Glase durch λ', so hat man $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$. Die Rechnung hat nun ergeben, dass für diesen Fall der gesammte Gangunterschied zwischen den interferirenden Strahlen br und kr' sich durch die Formel $2\delta \cos\alpha + \frac{\lambda}{2}$ ausdrücken lässt, falls α den Brechungswinkel cbv' und δ wieder die Dicke der Luftschicht bezeichnet. Statt dieser Formel kann man die noch allgemeinere $2\delta \cos\alpha \pm (2m+1)\frac{\lambda}{2} = \frac{2\,\delta \cos.\alpha}{\lambda} \pm \frac{(2m+1)\lambda}{2\lambda}$ einführen, wenn man annimmt, dass der durch die Umkehr der Schwingungen im Acte der Reflexion herbeigeführte Gangunterschied überhaupt um eine ungerade Anzahl $2m + 1$ von halben Wellenlängen grösser oder kleiner ist, als er mit blosser Berücksichtigung der Wege $bc + ck$ innerhalb der Luftschicht sein würde.*)

Fig. 84.



Nun ergeben sich aus dieser Formel die hellsten Stellen (oder Maxima der Lichtstärke), wenn man $\delta = \frac{\lambda}{4\cos.\alpha}, = \frac{3\lambda}{4\cos.\alpha}, = \frac{5\lambda}{4\cos.\alpha}, \ldots$ und die dunklen Stellen (oder Minima der Lichtstärke), wenn man $\delta = \frac{2\lambda}{4\cos.\alpha}, = \frac{4\lambda}{4\cos.\alpha}, = \frac{6\lambda}{4\cos.\alpha}, \ldots$ setzt. Fällt aber das Licht in einer Richtung ein, die sehr wenig von der Senkrechten oder Normalen vv abweicht, so lässt sich $\alpha = 0$, also $\cos.\alpha = 1$ setzen, und die eben aufgestellten Ausdrücke verwandeln sich in die uns schon bekannten (S. 145).

*) Vgl. Wilde in Poggend. Ann. Bd. LXXXII. S. 27 ff.

86. Betrachten wir die hindurchgegangenen Strahlen *cd* und *ed'* (Fig. 84), so rührt der letztere von einer Aetherwelle her, die innerhalb der Luftschicht zweimal reflectirt wurde. Hier heben sich aber jene Veränderungen bezüglich der Umkehr der Aetherschwingungen im Acte der Reflexion an den beiden Trennungsflächen auf, so dass zwischen dem direct hindurchgelassenen Strahlenbündel *abcd* und dem zweimal reflectirten kein weiterer Gangunterschied besteht als der in den Wegen *bcke* begründete. Dieser Gangunterschied zwischen *cd* und *e'd* ist also $= (bc + ck + ke) - bc = ck + ke$ oder, wenn man *ck* und *ke* als gleich gross mit der Dicke δ der Luftschicht annimmt, $= 2\delta$.

Setzt man nun hierin für δ nacheinander $\frac{1}{4}\lambda$, $\frac{2}{4}\lambda$, $\frac{3}{4}\lambda$, $\frac{4}{4}\lambda$, $\frac{5}{4}\lambda$, ..., so findet sich sofort, dass die durchgelassenen Strahlen *cd* und *ed'* wegen übereinstimmender Schwingungszustände eine helle Stelle erzeugen werden, wenn die Dicke der Luftschicht eine gerade Anzahl von Viertelwellenlängen beträgt, dagegen in Folge entgegengesetzter Schwingungszustände eine dunkle Stelle, falls die Tiefe der Luftschicht eine ungerade Anzahl von Viertelwellenlängen ausmacht.

Man erkennt also, dass im durchgelassenen Lichte helle Stellen da entstehen, wo das reflectirte Licht dunkle bewirkt, und so umgekehrt.

Fällt das Lichtbündel *ab* schiefer ein, so findet der Gangunterschied zwischen den Strahlen *cd* und *ed'* seinen Ausdruck in der Formel $\frac{2\delta \cos\alpha}{\lambda}$, wo α wieder der Brechungswinkel ist. Die Maxima der Lichtstärke folgen hieraus

$$\text{für } \delta = \frac{2\lambda}{4\cos.\alpha}, = \frac{4\lambda}{4\cos.\alpha}, = \frac{6\lambda}{4\cos.\alpha}, \ldots, \text{ die Minima}$$

$$\text{für } \delta = \frac{\lambda}{4\cos.\alpha} = \frac{3\lambda}{4\cos.\alpha}, = \frac{5\lambda}{4\cos.\alpha}, \ldots$$

Ist α sehr klein oder $= 0$, so ist $\cos\alpha = 1$, und die Ausdrücke für δ besagen dasselbe, was wir kurz zuvor in Bezug auf die hellen und dunklen Stellen ausgesprochen haben.

87. Lässt man die Ringsysteme nacheinander durch verschiedene homogene Lichtstrahlen entstehen, so werden die Ringe um so schmäler und rücken einander desto näher, je kürzer die Wellenlänge dieser Strahlen ist. So erscheinen die Ringe am kleinsten für violettes Licht, am grössten für rothes. Da nun die

hellen und dunklen Ringe für die verschiedenen Farbestrahlen nicht gleichmässig zusammenfallen, so müssen bei Anwendung von weissem Lichte so viele Ringsysteme entstehen, als dasselbe Farben enthält, die jedoch zum Theil sich decken und dadurch Mischfarben bewirken. Die Dicke der Schicht, bei welcher eine bestimmte Farbe erscheint, ist unter sonst gleichen Umständen nur abhängig von der Wellenlänge der sie bedingenden Strahlen; und so können an gewissen Stellen, wo eine bestimmte Farbe im Minimum auftritt, die übrigen im weissen Lichte vorkommenden Farbestrahlen noch im Verhältnisse ihrer Wellenlänge vorherrschen. Auch folgen die hellen und dunklen Ringe für eine und dieselbe Farbe nicht in gleichen Abständen aufeinander, sondern rücken einander näher, je weiter sie sich von dem Mittelpunkte der Erscheinung entfernen.

Aus der im vorigen Paragraph gegebenen Auseinandersetzung folgt aber, dass die Ringe für durchgelassenes weisses Licht complementär zu denen im reflectirten Licht erscheinen müssen. Die durchgelassenen Farben sind jedoch, wegen Beimengung vieler weisser Strahlen, minder intensiv als die reflectirten. —

Es giebt nun noch eine andere Art von Farbenringen, die zum Theil schon von Newton und später in abgeänderter Weise von verschiedenen Anderen beobachtet sind. Man fasst diese Erscheinungen jetzt gewöhnlich unter dem Ausdrucke „Farben dicker Platten" zusammen. Auch sie finden ihre vollständige Erklärung in dem Principe der Interferenz.*)

88. Die **Beugungs**erscheinungen sowohl als auch Newton's Farbenringe boten ein Mittel dar zur numerischen Bestimmung der Wellenlängen und Oscillationszahlen der Strahlen, welche die veschiedenen homogenen Farben bedingen.

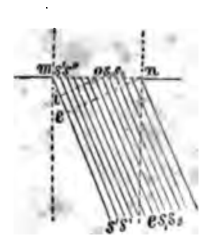
Wir wissen, dass homogenes Licht bei seinem Durchgange durch eine schmale Spalte, in Folge der Interferenz der von der Oeffnung ausgehenden Strahlen, eine Reihe abwechselnd heller und dunkler Streifen (Fransen) liefert. Bei einer schmalen vertikalen Spalte fanden wir die ersten dunklen Streifen da, wo der Gang-

---

*) Vgl. Th. Young: On the Theory of Light and Colours. Philos. Transact. f. 1802. p. 41. — J. Herschel: Encyclopaedia metropolitana, Arts. 676 ff. — Insbesondere Stokes: Transact. of the Cambridge Phil. Society. Vol. IX, pt. II.; — Poggend. Ann. Bd. LXXXVII. b. (Ergänzungsbd. III.) S. 546 ff.

unterschied *me* der Randstrahlen eines seitwärts ausfahrenden Lichtbündels eine ganze Wellenlänge beträgt (§. 80). Nun ist aber $\frac{me}{mn} = \sin\alpha$, wenn man durch α den Winkel *mne* bezeichnet. Also ist die Länge einer Welle $me = mn . \sin . \alpha$. Aus diesem Ausdrucke erkennt man sofort, dass der Winkel α und demgemäss auch die Breite des Spectrums um so grösser ausfällt, je kleiner *mn*, d. h. die Breite des Spaltes, und je grösser *me* oder die Wellenlänge des Lichtes ist.

Fig 85.



Die Wellenlänge findet man aus der Formel $me = mn . \sin . \alpha$, falls die Breite *mn* des Spaltes und der Winkel α bekannt sind. Den letzteren erhält man aber, wenn man die Winkelabstände der dunklen Streifen von der Mitte der ganzen Beugungserscheinung bestimmt. Man bringt nämlich die beugende Spalte vor das Objectiv des Fernrohres eines Theodolithen, mit dem man die Winkel noch bis auf 1 Secunde ermitteln kann, und richtet das Fernrohr so, dass der vertikale Theil des Fadenkreuzes gerade auf die Mitte des ganzen Bildes einsteht. Alsdann bringt man nach und nach jeden dunklen Streifen mit dem vertikalen Faden zum Decken, indem man das Fernrohr allmälig dreht, und liest die Winkelwerthe der Drehung am horizontalen Kreise des Theodolithen mit Hülfe des Nonius ab.

So erhielt Schwerd*) bei Anwendung von homogenem rothem Lichte und einer Spalte von 1,353 Millimeter Breite für die dunklen Streifen folgende Winkelabstände von der Mitte der ganzen Beugungserscheinung:

Dunkler Streifen:	1.	2.	3.	4.
Winkelabstand:	1′ 41″	3′ 18″	4′ 55″	6′ 27″,

woraus man als Mittel für den Winkelabstand zweier aufeinander folgender Streifen den Werth 1′ 38″,1 findet.

Für eine andere Spalte von 1,274 Millimeter Breite bekam er, gleichfalls für rothes Licht und nach derselben Methode, für den Abstand zweier dunkler Streifen im Mittel 1′ 45″,7. Und für eine Spalte von 0^{mm},689 Breite im Mittel 3′ 7″.

*) Die Beugungserscheinungen etc. Mannh. 1835. S. 32.

Diese Werthe für *mn* und α in die obige Forme 1 eingeführ geben nacheinander $me = 1^{mm},353 . \sin 1' 38'',1 = 0^{mm},000643$, $me = 1,274 . \sin 1' 45'',7 = 0^{mm},000653$, $me = 0,689 . \sin 3' 17'' = 0^{mm},000625$, so dass die Wellenlänge für rothes Licht im Mittel $= 0^{mm},000640$ ist.

Fraunhofer*) fand auf Grund derartiger mit Genauigkeit angestellter Messungen für die Wellenlängen der Strahlen, welche den Stellen *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H* im Sonnenspectrum entsprechen, folgende Werthe:

	Pariser Zoll.		Millimeter.
für *B*	0,00002541	=	0,0006879
„ *C*	0,00002422	=	0,0006559
„ *D*	0,00002175	=	0,0005888
„ *E*	0,00001945	=	0,0005265
„ *F*	0,00001794	=	0,0004856
„ *G*	0,00001587	=	0,0004296
„ *H*	0,00001464	=	0,0003963

Wie auch die Newton'schen Farbenringe zur Ermittelung der Wellenlängen der verschiedenen Farbestrahlen dienen konnten, erkennt man sofort, wenn man sich erinnert, dass die Dicke der dünnen Luftschicht beim ersten dunklen Ringe für reflectirtes Licht eine halbe und beim zweiten eine ganze Wellenlänge, etc. beträgt (§. 84). Kennt man nun den Durchmesser der Linse, welche bei Erzeugung der Newton'schen Ringe eine Glastafel berührt, so kann man, da sich der Durchmesser eines Ringes mit Genauigkeit messen lässt, auch die Dicke der Schicht messen, die einem bestimmten Ringe entspricht. Aus der Dicke der Schicht findet sich dann leicht die Wellenlänge für die bestimmte homogene Farbe, die man zur Erzeugung des Ringsystems verwendet. So konnten schon die von Newton an den Ringen vorgenommenen Messungen zur Ermittelung der Wellenlängen für die verschiedenen homogenen Farben benutzt werden. Die auf diesem Wege gewonnenen Resultate stimmen aber mit den an den Beugungserscheinungen erhaltenen so genau überein, als sich nur immer erwarten lässt.

Wir haben bereits an einem anderen Orte (vgl. §. 75) hervorgehoben, dass die Wellenlängen in verschiedenen Medien von un-

---

*) Gilbert's Ann. Bd. 74. S. 337.

gleicher Grösse sind, und zwar in solchen, worin sich das Licht langsamer fortpflanzt, kleiner. Hierauf bezügliche Messungen wurden schon von Fraunhofer*) und in neuerer Zeit von Nobert**) vorgenommen. Der letztere benutzte zu diesem Behufe eine zu Interferenzversuchen geeignete Glasplatte, die nach Art der Glasmikrometer (S. 64) eine Reihe in Gruppen geordnete Parallellinien enthält und vermittelst dieser ein Gitter darstellt, das in geeigneter Weise auf den Objectivtisch eines zusammengesetzten Mikroskopes gelegt in diesem eine Interferenzerscheinung gewährt. Derselbe erhielt nun für die Wellenlängen der nachbezeichneten Farben in Luft und Glas die beigesetzten Werthe (in Pariser Linien).

Luft.		Glas.	
Sehr tief roth . .	0''',000338	roth	0''',000199
tief roth	328	roth	188
hellorange . . .	281	orange	177
schwefelgelb . . .	258	brandgelb . . .	175
grün	234	grüngelb	163
blaugrün	223	grün	150
blau	211	indigo	138
indigo	199	rothviolett . . .	125
violett	187		
tief violett . . .	176		

Das arithmetische Mittel der Wellenlängen ist hiernach in der Luft $= 0''',0002435$ und im Glase $= 0''',0001589$. Daher das Brechungsverhältniss***) in Bezug auf diese beiden Medien $= \frac{0,0002435}{0,0001589} = 1,525$, ein Werth, der mit dem auf anderem genauen Wege abgeleiteten Brechungsexponenten bis auf drei Einheiten der dritten Decimale vollkommen übereinstimmt. —

Endlich mögen hier auch noch die Zahlen folgen, welche Helmholtz****) für die Wellenlängen der Complementärfarben des

*) Neue Modificationen des Lichtes etc.: Denkschr. der königl. bair. Akad. der Wissensch. für 1821 u. 1822.

**) Ueber eine Glasplatte mit Theilungen zur Bestimmung der Wellenlänge und relativen Geschwindigkeit des Lichtes in der Luft und im Glase. Poggend. Ann. Bd. LXXXV. S. 90.

***) Vergl. §. 75 d. S.

****) Poggend. Ann. Bd. XCIV. S. 14 f.

Sonnenspectrums erhielt. Die Angaben beziehen sich auf den Pariser Zoll.

Farbe.	Wellenlänge.	Complementärfarbe.	Wellenlänge.	Verhältniss der Wellenlängen.
Roth	0,00002425	Grünblau	0,00001818	1,334
Orange	2244	Blau	1809	1,240
Goldgelb	2162	Blau	1793	1,206
Goldgelb	2120	Blau	1781	1,190
Gelb	2095	Indigblau	1716	1,221
Gelb	2085	Indigblau	1706	1,222
Grüngelb	2082	Violett	1600	1,301

Im Violett wurden, seiner Lichtschwäche wegen, alle äussersten Strahlen der Wellenlänge von 1600 ab zusammengefasst.

Nach diesen Zahlen construirte Helmholtz*) eine Curve, welche die Wellenlänge einer Farbe als Function der Wellenlänge ihrer Complementärfarbe ausdrückt.

89. Nun besteht zwischen der Wellenlänge l und Schwingungsdauer t einer Aetherwelle nebst der Fortpflanzungsgeschwindigkeit v des Lichtes die Relation $l = vt$ (§. 72). Es ist aber auch, wenn man die Anzahl der Schwingungen in einer Secunde durch n bezeichnet, $v = nl$. Denn die Wellenlänge ist die Strecke, durch welche sich die schwingende Bewegung fortpflanzt, während ein Aethertheilchen eine ganze Schwingung vollendet. So wird also nach n Schwingungen desselben Aethertheilchens sich die Wellenbewegung, von ihm angerechnet, durch eine Strecke fortgepflanzt haben, die $= nl$ ist. Dies giebt aber auch die Geschwindigkeit des Lichtes, nämlich den Weg, durch welchen sich dasselbe während einer Sekunde fortpflanzt.

Aus der Formel $v = nl$ folgt $n = \frac{v}{l}$, d. h. man erhält die Anzahl der Schwingungen, welche die zu einer bestimmten Aetherwelle (oder zu einem bestimmten Farbestrahl) gehörigen Aethertheilchen in einer Secunde machen, wenn man die bekannte Geschwindigkeit v des Lichtes durch die betreffende Wellenlänge dividirt. Man braucht also nur in die Formel $n = \frac{v}{l}$, um für

*) A. a. O. S. 16.

die einzelnen prismatischen Farben die zugehörigen Oscillationszahlen zu finden, nacheinander für l den numerischen Werth der entsprechenden Wellenlängen einzuführen.

Die nachstehende Tabelle enthält die Wellenlängen und Oscillationen des Aethers für die prismatischen Farben. Die Berechnung der Wellenlängen stützte sich auf Newton's Messungen an den Ringen und zwar sind die Messungen in Millimetern von Fresnel*), in englischen Zollen für die Grenzen der Farben von Biot**) berechnet. Die Wellenlängen für die mittleren Farben in engl. Zollen und die Columne für die Oscillationszahlen hat E. Wilde***) hinzugefügt. Bei Berechnung der letzteren ist die Geschwindigkeit v des Lichtes nach Struve's Bestimmungen zu 41513 deutschen Meilen (in der Secunde) genommen, oder, da eine deutsche Meile = 7407000 Millimeter ist, zu 41513.7407000^{mm}.

Farbe.	Wellenlänge in der Luft in engl. Zollen.	Wellenlänge in der Luft in Millimetern.	Anzahl der Oscillationen in 1 Secunde.
Aeusserstes Roth	0,0000254	0,000645	476 Billionen.
Mittleres Roth	244	620	496
Grenze zw. Roth und Orange	235	596	515
Mittleres Orange	229	583	527
Grenze zw. Orange und Gelb	225	571	538
Mittleres Gelb	217	551	558
Grenze zw. Gelb und Grün	209	532	578
Mittleres Grün	201	512	600
Grenze zw. Grün und Blau	194	492	624
Mittleres Blau	187	475	647
Grenze zw. Blau und Indigo	180	459	669
Mittleres Indigo	176	449	684
Grenze zw. Indigo und Violett	173	439	700
Mittleres Violett	166	423	727
Aeusserstes Violett	160	406	757

Man sieht, dass die Wellenlängen der einzelnen Farben sehr kleine Grössen sind, während dagegen die Anzahl der Oscillationen in einer Secunde ungemein gross ist. Die Aethertheilchen voll-



*) S. Poggend. Ann. Bd. III. S. 114.
**) Traité de Phys. tom. IV. p. 109.
***) Poggend. Ann. Bd. LXXXII. S. 189.

ziehen, wenn sie das äusserste Roth erzeugen, 476 Billionen Schwingungen, und für das äusserste Violett deren 757 Billionen in der Secunde. Auch finden wir hier, was wir schon öfter erwähnt haben, dass die Wellenlängen für die stärker brechbaren Strahlen kürzer als für die minder brechbaren sind. Mit den Oscillationszahlen verhält es sich umgekehrt. Je grösser aber die Anzahl der Oscillationen in einer Secunde ist, desto mehr Wellenlängen kommen bezüglich der verschiedenen Farbestrahlen auf ein und dieselbe Raumstrecke, wie dies auch die obige Formel $v = nl$ erkennen lässt.

90. Nachstehend (S. 156) geben wir noch eine von Esselbach berechnete Tabelle der Wellenlängen, die sich auch auf den ultravioletten Theil des Sonnenspectrums erstreckt. Die Buchstaben *A* bis *H* bezeichnen die Fraunhofer'schen Linien im gewöhnlichen Spectrum, die Buchstaben *L* bis *R* aber die im ultravioletten Theile wahrnehmbaren festen Linien.

Die Isolirung des ultravioletten Theiles geschah von Esselbach mittelst zweier Quarzprismen. Das eine empfing den Sonnenstrahl, welcher durch eine Spalte in horizontaler Richtung in ein dunkles Zimmer eintrat. Den aus diesem Prisma hervortretenden Strahlen stand aber eine zweite Spalte (in einem Schirme) entgegen, so dass dieselbe durch geringe Drehung des Prisma irgend welche Theile des Ultraviolett hindurchlassen konnte. Das zweite Prisma war vor dem Objectiv eines Theodolithen befestigt, durch dessen Fernrohr man den ultravioletten Theil des Spectrums mit scharfen Fraunhofer'schen Linien durchzogen sah. Der Farbeneindruck des übervioletten Theiles war gewöhnlich gleich dem von Lavendelgrau. Doch erschien bei geringerer Helligkeit der Grund indigoblau und bei noch grösserer Lichtschwäche mitunter auch violett.

Die Berechnung der Wellenlänge für die übervioletten Strahlen, welche den festen Linien im Spectrum von *L* bis *R* entsprechen, stützte Esselbach*) auf die sog. Talbot'schen dunklen Linien, die man wahrnimmt, wenn man bei Betrachtung eines Spectrums im Fernrohr ein dünnes Glimmerblättchen von der Seite des Violett her vor die halbe Pupille bringt. Es ist klar, dass

*) S. Poggend. Ann. Bd. XCVIII. S. 514, woselbst sich auch (Taf. V. Fig. 6) eine Abbildung des ganzen Spectrums vom Roth bis zum letzten Ultraviolett findet.

die beiden Lichtbündel, von denen das eine durch das Blättchen und das andere in der Luft durch die zweite Hälfte der Pupille in das Auge dringt, zur Interferenz gelangen und sich gegenseitig verstärken oder aufheben werden, je nachdem dieselben um eine gerade oder ungerade Anzahl einer halben Wellenlänge (oder Schwingung) differiren. Kennt man nun die Dicke δ des Blättchens und die Wellenlängen λ, l eines homogenen Lichtstrahles in der Luft und dem Blättchen mit dem auf diesen Strahl bezüglichen Brechungsverhältniss n; so lässt sich leicht ein Ausdruck gewinnen für die Differenz zwischen der Anzahl der Schwingungen, welche der durch das Blättchen dringende Strahl (in der Zeiteinheit) vollendet, und der Anzahl von Schwingungen, die der Strahl auf einer der Dicke des Blättchens gleichen Strecke in der Luft vollzieht. Man hat nämlich für diese Differenz die Formel $\frac{\delta}{l} - \frac{\delta}{\lambda}$, oder, da $l = \frac{\lambda}{n}$ ist, $\frac{\delta}{\lambda}(n-1)$. Und ebenso hat man für einen anderen Farbestrahl, dessen Wellenlänge in der Luft $= \lambda'$ und für welchen das Brechungsverhältniss im Blättchen $= n'$ ist, die Formel $\frac{\delta}{\lambda'}(n'-1)$.

Wenn nun im Spectrum vom Roth nach dem Violett die Farbestrahlen verschwinden, bezüglich deren die Verzögerung (wegen des Blättchens) eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, so wird natürlich für jede folgende Talbot'sche Linie nach dem brechbareren Ende des Spectrums hin die Verzörung allemal um eine ganze Wellenlänge zunehmen. Daher hat man, wenn die Anzahl der Talbot'schen Linien zwischen zwei Strahlen, welchen in Bezug auf das Blättchen die Brechungsverhältnisse n und n' zukommen, $= p$ ist, die Gleichung $\frac{\delta}{\lambda'}(n'-1) = \frac{\delta}{\lambda}(n-1) + p$, und hieraus $\lambda' = \frac{\delta\lambda(n'-1)}{\delta(n-1)+p\lambda}$.

Diese Formel benutzte Esselbach zur Bestimmung der Wellenlängen λ' der ultravioletten Strahlen. Zur Erzeugung der Talbot'schen Linien diente ein senkrecht zur Axe geschliffenes Quarzblättchen von 0,195 Millimeter Dicke, welcher Werth für δ in die Formel einzuführen war, während man für λ die Wellenlänge nahm, die dem der festen Linie H entsprechenden Strahle zukam. Da überdies die Zahl p durch die Beobachtung gegeben und die

Brechungsexponenten n, n' des gewöhnlichen Strahles im Quarze ermittelt waren, so liess sich auch die Wellenlänge λ' des betreffenden ultravioletten Strahles berechnen.

Feste Linien im Spectrum.	Berechnete Wellenlängen in Millimetern.	Von Frauenhofer berechnete Werthe der Wellenlängen.
B	0,0006874	0,0006878
C	0,0006564	0,0006564
D	0,0005886	0,0005888
E	0,0005260	0,0005260
F	0,0004845	0,0004843
G	0,0004287	0,0004291
H	0,0003929	0,0003929
L	0,0003791	
M	0,0003657	
N	0,0003498	
O	0,0003360	
P	0,0003290	
Q	0,0003232	
R	0,0003091	

Aus dieser Tafel ergiebt sich, dass das Verhältniss der Schwingungszahlen für die den Linien *B* und *R* entsprechenden Strahlen etwa dem einer Octave gleichkommt.

Gestützt auf die Esselbach'sche Tabelle hat Helmholtz*), wie folgende Tabelle zeigt, eine Zusammenstellung der Farben mit den Tonhöhen gegeben, wobei die Wellenlänge des Tones $c = 1$ und die Linie *A* des Spectrums dem Tone *G* entsprechend angenommen ist.

Töne.	Wellenlänge des Tones.	Wellenlänge der Farbe.	Farben.
Fis	$\frac{64}{45}$	0,0008124^{mm}	Ende des Roth
G	$\frac{4}{3}$	0,0007617	Roth
Gis	$\frac{32}{25}$	0,0007312	Roth
A	$\frac{6}{5}$	0,0006721	Roth
B	$\frac{10}{9}$	0,0006347	Rothorange

*) Berichte der Berliner Akademie, 1855. S. 761.

Töne.	Wellenlänge des Tones.	Wellenlänge der Farbe.	Farben.
H	$\frac{16}{15}$	0,0006094^{mm}	Orange
c	1	0,0005713	Gelb
cis	$\frac{24}{25}$	0,0005217	Grün
d	$\frac{8}{9}$	0,0005078	Grünblau
es	$\frac{5}{6}$	0,0004761	Cyanblau
e	$\frac{4}{5}$	0,0004570	Indigblau
f	$\frac{3}{4}$	0,0004285	Violett
fis	$\frac{32}{45}$	0,0004062	Violett
g	$\frac{2}{3}$	0,0003808	Ueberviolett
gis	$\frac{16}{25}$	0,0003656	Ueberviolett
a	$\frac{3}{5}$	0,0003385	Ueberviolett
b	$\frac{5}{9}$	0,0003173	Ueberviolett
h	$\frac{8}{15}$	0,0003047	Ueberviolett

Hiernach würde der ganze sichtbare Theil des Sonnenspectrums vom äussersten Roth bis zum äussersten Violett ungefähr eine Octave nebst einer Quarte betragen.

91. Homogene Lichtstrahlen, d. h. solche von gleicher Wellenlänge und Schwingungsdauer, welche darum dieselbe Farbenempfindung veranlassen, — können sich immer noch hinsichtlich der Richtung unterscheiden, worin die sie constituirenden Aethertheilchen ihre Schwingungen vollziehen, vorausgesetzt, dass die letzteren stets senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Strahlen bleiben. So können die Aethertheilchen bei dem einen Strahle nach allen möglichen auf seiner Richtung senkrechten Geraden schwingen, während ihre Schwingungen bei einem anderen Strahl unter einander parallel geschehen, wie in nebenstehender Figur angedeutet ist, wo die zur Linie *AB* senkrechten Striche angeben, dass alle Aethertheilchen in geraden und zu einander parallelen Linien schwingen. Einen solchen Lichtstrahl nennt man, im Gegensatze zu einem gewöhnlichen, dessen Schwingungen eben nach allen möglichen auf seiner Richtung senkrechten Geraden geschehen können, einen polarisirten und zwar, weil er durch geradlinige, zu einander parallele Schwingungen der Aethertheilchen gebildet wird, einen geradlinig polarisirten Lichtstrahl.

Fig. 86.

A B

Die Schwingungen eines solchen Strahles liegen alle in einer und derselben Ebene, die man die Schwingungsebene nennt. Dieselbe ist in dem angeführten Beispiele die Ebene des Papiers; sie kann aber auch irgend eine andere Ebene sein. Das Wesentliche eines geradlinig polarisirten Lichtstrahles liegt in dem Parallelismus seiner geradlinigen Oscillationen, die freilich für jeden gegebenen Fall in einer bestimmten Ebene liegen. Eine zweite Ebene, die durch den Lichtstrahl senkrecht auf die Schwingungsebene gedacht ist, kann man dann die Polarisationsebene nennen, so dass also die Schwingungen des polarisirten Strahles senkrecht gegen die Polarisationsebene zu beiden Seiten derselben stattfinden. Jedes einzelne Aethertheilchen entfernt sich aus seiner Ruhelage nach einer Seite hin, kehrt nach seinem grössten Ausschlage in die Polarisationsebene, d. h. in seine Ruhelage zurück, und weicht dann nach der entgegengesetzten Seite aus. Sonst besteht auch ein polarisirter Strahl aus einer Summe gleicher Strecken oder Wellenlängen, und jede einzelne Welle aus zwei Hälften, deren Aethertheilchen sich bezüglich der Ruhelage in entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden.

92. Hat man nun zwei geradlinig polarisirte Lichtstrahlen, deren Schwingungs- und Polarisationsebenen beziehungsweise miteinander übereinstimmen, so sagt man von ihnen, dass sie gleichartig, d. h. in derselben Ebene polarisirt seien. Dies ist z. B. der Fall bei zwei Strahlen, deren Schwingungen sämmtlich in der Ebene des Papiers geschehen (N. 1 in nebenstehender Figur), und ebenso auch bei Strahlen, deren Aethertheilchen alle in einer Ebene schwingen, die senkrecht zur Ebene des Papiers liegt, wie in N. 2 durch Punkte angedeutet ist, welche die Projectionen der Schwingungsbahnen bezeichnen sollen. Im ersten Falle stehen die zu einander parallelen Polarisationsebenen beider Strahlen senkrecht auf der Ebene des Papiers, während die Schwingungen sämmtlicher Aethertheilchen in dieser Ebene geschehen; im zweiten Falle, wo die Schwingungen der Aethertheilchen senkrecht zur Ebene des Papiers sind, fallen die Polarisationsebenen beider Strahlen mit dieser Ebene zusammen. Je zwei solche gleichartig polarisirte Lichtstrahlen können sich nun, wenn sie sich in derselben Richtung fortpflanzen,

Fig. 87.

auf die bereits angegebene Weise (§. 76 ff.) je nach ihrem Gangunterschiede verstärken oder auch ganz vernichten.

Wenn dagegen für zwei geradlinig polarisirte Lichtstrahlen der so eben hervorgehobene Parallelismus der Polarisations- und Schwingungsebenen nicht besteht, so sind sie ungleichartig, d. h. in verschiedenen Ebenen polarisirt. Die Schwingungen der Aethertheilchen geschehen dann in beiden Strahlen nicht zu einander parallel, sondern in verschiedenen Ebenen. Nun können die Schwingungsebenen beider Strahlen irgend einen Winkel mit einander einschliessen; stehen aber dieselben auf einander senkrecht, wie bei den Strahlen *b* und *c* in Fig. 87, so sagt man, dass die Strahlen senkrecht zueinander polarisirt seien. Solche Strahlen werden im Falle ihres Zusammentreffens zwar einen bestimmten gegenseitigen Einfluss ausüben, allein sie können sich unter keinen Umständen gegenseitig vernichten, weil dies in der Wirkung beider Wellensysteme einen Gegensatz erfordert, der nur in den zuvor betrachteten Fällen gleichartig polarisirter Strahlen möglich ist. Hier kann es geschehen, dass ein Aethertheilchen von zwei entgegengesetzten Seiten her, die in derselben Geraden liegen, gleiche Einwirkungen empfängt, was offenbar zur Ruhe führen muss. Dagegen werden zwei geradlinig auf einander senkrecht polarisirte Strahlen ein Aetertheilchen, das sie treffen, keinenfalls zu zwei Bewegungen nach gerade entgegengesetzten Richtungen anregen, und daher auch in ihren Wirkungen sich nicht ganz aufheben können. Was aber geschehen wird, lässt sich mit Hilfe des Parallelogrammes der Kräfte übersehen.

Treffen zwei gleich starke, auf einander senkrecht und geradlinig polarisirte Wellensysteme, zwischen denen entweder gar kein Gangunterschied oder nur ein solcher von einem geraden Vielfachen einer halben Wellenlänge besteht, auf ein Aethertheilchen, so wird dieses durch zwei geradlinige Schwingungen von gleicher Dauer, die mit einander einen rechten Winkel einschliessen, nach zwei aufeinander senkrechten Richtungen zur Bewegung angeregt. Wenn nun die zusammenwirkenden Schwingungen in ihren Phasen übereinstimmen, so wird das Aethertheilchen zu einer Oscillation bestimmt, die wieder geradlinig ist und dieselbe Dauer wie jene hat, während ihre Weite (Amplitude) gleich der Diagonale des Parallelogramms ist, das sich aus den Weiten jener beiden Oscillationen construiren lässt. Legt nämlich das schwingende Theilchen

vermöge der einen Oscillation den Weg *cb* und zufolge der anderen in derselben Zeit *t* den Weg *cd* zurück, so ist es unter gleich-

Fig. 88.

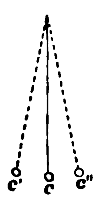
zeitiger Einwirkung beider Oscillationen am Ende der Zeit *t* im Punkte *e* der Diagonale *ce*, welche die Schwingungsbahn des Theilchens vorstellt. Besteht dagegen zwischen beiden Wellensystemen ein Gangunterschied von einer Viertelwellenlänge oder sind, was dasselbe, die Phasenzeiten beider Oscillationen, die das Aethertheilchen anregen, um $^1/_4$ der gemeinsamen Schwingungsdauer dieser Oscillationen unterschieden, so entsteht eine kreisförmige Schwingung des Aethertheilchens um seine Gleichgewichtslage, und der Halbmesser dieser kreisförmigen Bahn ist gleich der gemeinschaftlichen Weite beider zusammenwirkenden Oscillationen. Sind aber die beiden aufeinander senkrecht polarisirten Wellensysteme nicht, wie wir bisher annah-

Fig. 89.

men, von gleicher Intensität, haben also die zusammenwirkenden Schwingungen ungleiche Weite, so resultirt eine elliptische Schwingung des betreffenden Aethertheilchens um seine Gleichgewichtslage. Diese Schwingung lässt sich als der allgemeinste Fall betrachten, da z. B. bei einer Gleichheit der Halbaxen *ca* und *cb* die Ellipse in den Kreis übergeht, was dem besonderen Falle entspricht, dass die Amplituden (Weiten) der zusammenwirkenden Oscillationen einander gleich sind. Beträgt endlich der Phasenunterschied der letzteren bei gleicher Amplitude mehr oder weniger als $^1/_4$ ihrer Schwingungsdauer, so kann gleichfalls eine elliptische Schwingung entstehen.

93. Man kann die angedeuteten Vorgänge in bekannter Weise mit einem etwas langen Pendel erläutern, das aus einem Faden besteht, der an einem Ende befestigt und am anderen mit einer kleinen Bleikugel beschwert ist. Entfernt man das Pendel ein wenig aus seiner Gleichgewichtslage, d. h. aus der vertikalen Lage *ac*, um es dann sich selbst zu überlassen, so schwingt der

Fig. 90.



Punkt *c* in einer vertikalen Lage hin und her. Derselbe repräsentirt dann die Schwingungen der Aethertheilchen in einem gradlinig polarisirten Lichtstrahle. Nun empfange die Kugel *c* einen Stoss, senkrecht auf ihre Bewegungsrichtung und von solcher Stärke, dass er derselben eine Geschwindigkeit zu ertheilen vermag, die gleich der ist, die sie bei ihrem Durchgange durch die Gleichgewichtslage hat. Die Kugel ist dann zu zwei gleichen, aufeinander senk-

rechten Schwingungen angeregt, wie es der Fall bei einem Aethertheilchen ist, auf welches zwei gleich starke, aber aufeinander senkrecht polarisirte Lichtstrahlen treffen. Empfängt die Kugel den Stoss in dem Augenblick, wo sie durch die Gleichgewichtslage c, etwa in der Richtung von c' nach c'', geht, so ist die resultirende Schwingung wieder eine geradlinige; nur halbirt die neue Schwingungsrichtung ce den Winkel, den die Componenten cb und cc'' miteinander einschliessen (Fig. 91. N. 1). Bewegt sich die Kugel umgekehrt von c'' nach c', während sie den Stoss in c empfängt, so verhält es sich im Wesentlichen ebenso, nur mit dem Unterschiede, dass die neue Schwingungsrichtung ce um ebensoviel nach der entgegengesetzten Seite hingeneigt ist (2).

Fig 91.

Nimmt man die Zeit, welche verfliesst, während sich die Kugel (Fig. 90) von c' durch c nach c'' und wieder zurück nach c' bewegt, als die einer vollständigen Schwingung an, so ist beim Eintritt der Kugel in die Lage c $^1/_4$ dieser Schwingungsdauer verflossen, bei c'' $^2/_4$, bei der Zurückkunft der Kugel in c $^3/_4$ und beim Eintritt in c' $^4/_4$ derselben Zeit. Setzen wir nun an die Stelle der Kugel ein Aethertheilchen, das nach $^1/_4$ der ganzen Schwingungsdauer zum ersten Mal die Gleichgewichtslage passirt, um nach der entgegengesetzten Seite auszuweichen, und in diesem Moment von einer zweiten zur vorigen senkrechten Schwingung afficirt wird. Dann ist der Phasenunterschied beider Schwingungen, die in c zusammentreffen, $= {}^1/_4 - {}^1/_4 = 0$, und es entsteht aus beiden eine neue gradlinige Schwingung, wie Fig. 91 N. 1 zeigt. Geschieht die Einwirkung der zweiten Schwingung, nachdem für sie wie zuvor $^1/_4$ der ganzen Schwingungsdauer verflossen ist, dagegen erst in dem Moment, wo das erste Aethertheilchen in Folge der ersten Schwingung zum zweiten Mal seine Gleichgewichtslage passirt, so hat man für den Phasenunterschied beider Schwingungen $^3/_4 - {}^1/_4 = {}^2/_4 = {}^1/_2$, und es entsteht auch jetzt eine geradlinige Schwingung, aber so wie es Fig. 91 N. 2 andeutet. Beginnt drittens die Wirkung der zweiten Schwingung in dem Augenblick, wo das Aethertheilchen wegen der ersten Schwingung im Punkte c'' seiner Bahn anlangt und $^2/_4$ der Schwingungsdauer verflossen ist, so beträgt der Phasenunterschied beider Schwingungen $^2/_4 - {}^1/_4 = {}^1/_4$. Die resultirende Schwingung ist dann eine kreisförmige, ebenso, wenn das Aethertheilchen bei seiner Rückkunft in c' die Einwirkung der zweiten

Schwingung erfährt, und der Phasenunterschied $= {}^4/_4 - {}^1/_4 = {}^3/_4$ ist; doch geschieht in diesem Falle die Kreisbewegung im entgegengesetzten Sinne. Und in der That, wenn man die Pendelkugel in den Punkten c' und c'' ihrer Schwingungsbahn senkrecht gegen diese stösst, so nimmt dieselbe in beiden Fällen, aber in entgegengesetztem Sinne, eine kreisförmige Schwingung an. Trifft endlich der Stoss die Kugel zwischen c' und c oder zwischen c und c'', so entstehen elliptische Schwingungen, welche dem Falle entsprechen, dass die Phasendifferenz der senkrecht aufeinander wirkenden Schwingungen bei gleicher Amplitude nicht gerade $^1/_4$ oder $^1/_2$ etc. der ganzen Schwingungsdauer beträgt.*)

94. So kann also aus dem Zusammentreffen zweier gradlinig und senkrecht aufeinander polarisirter Lichtstrahlen ein Lichtstrahl entstehen, dessen Schwingungen senkrecht zu seiner Fortpflanzungsrichtung entweder in kreisförmigen oder elliptischen Bahnen geschehen. Man nennt einen solchen Lichtstrahl, je nachdem das eine oder andere der Fall ist, einen circular oder elliptisch polarisirten Strahl. Indessen können die Aethertheilchen, welche einen derartigen Strahl fortpflanzen, ihre Bahnen auf zwei verschiedene Weisen vollziehen, nämlich entweder von der Rechten gegen die Linke oder im umgekehrten Sinne. Deshalb spricht man von rechts und links circular oder elliptisch polarisirtem Lichte.

Denkt man sich z. B. einen circular polarisirten Lichtstrahl, der von einem Punkte in horizontaler Richtung nach unserem Auge fortschreitet, so bewegen sich die Aethertheilchen, falls der Strahl rechts polarisirt ist, in der oberen Hälfte ihrer kreisförmigen Bahn von der linken zur rechten, in der unteren Hälfte aber von der rechten zur linken Seite. Da sich jedoch die kreisförmige Schwingung wie jede andere allmälig von Theilchen zu Theilchen fortpflanzt, so können die weiter vom Ausgangspunkt des Strahles gelegenen Theilchen sich nicht in derselben Stelle ihrer Bahn befinden wie die, jenem Punkte näher gelegenen Theilchen, die gewiss schon weiter in ihrer Schwingungsbahn fortgeschritten sein werden. Die kreisförmigen Bahnen sämmtlicher Aethertheilchen, die den circular polarisirten Strahl fortpflanzen, stellen

*) Vgl. hierzu Dove: Darstellung der Farbenlehre und optische Studien Berl. 1853. S. 124.

zusammen einen Cylinder dar, dessen Axe die Richtung des Strahles selbst ist. Denkt man sich nun die Orte, welche die Aethertheilchen in irgend einem Augenblicke in ihren Bahnen einnehmen, durch eine Linie verbunden, so erhält man eine Schraubenlinie, die in unserem Falle eine rechtsgewundene ist. Die Höhe des Schraubenganges entspricht hier der Wellenlänge des Strahles. Und während der Fortpflanzung des letzteren dreht sich die Schraubenlinie mit gleichförmiger Geschwindigkeit von der linken gegen die rechte um ihre Axe. Bei einem links polarisirten Strahle verhält es sich umgekehrt. — Aehnliche Verhältnisse gelten für einen elliptisch polarisirten Lichtstrahl.

Es gibt nun eine Menge von Lichterscheinungen, die man unter dem Namen „Polarisation des Lichtes" zusammenfasst, und die in den zuvor erläuterten Principien ihre Erklärung finden. Wir heben nachstehend einige hervor.

95. Wenn ein Sonnenstrahl oder auch ein Lichtstrahl von einer weissen Wolke unter einem Winkel von 35° 25′ auf eine Glastafel fällt, — deren Rückseite, um sonstiges durchgehendes Licht abzuhalten, geschwärzt ist, — so wird ein reflectirter Lichtstrahl *bc* entstehen, der unter demselben Winkel (von 35° 25′) auf eine zweite mit der ersten parallelen Glasplatte fallen möge. Der Strahl *bc* wird dann von der letzteren in gewöhnlicher Weise nach der Richtung *cd* reflectirt. Wenn man aber jetzt den zweiten Spiegel ohne anderweitige Veränderung der Umstände um den Strahl *bc* als Axe dreht, so wird der Parallelismus beider Spiegelflächen allmälig aufgehoben, während doch der Winkel, welchen der Strahl *bc* mit dem zweiten Spiegel macht, unverändert bleibt. Bei dieser Drehung nimmt nun die Intensität des vom oberen Spiegel reflectirten Strahles beständig ab, und der Strahl *bc* wird von diesem Spiegel gar nicht mehr reflectirt, wenn bezüglich des letzteren die Einfalls- oder Reflexionsebene des Strahles mit der des unteren Spiegels einen rechten Winkel macht. Setzt man die Drehung des oberen Spiegels noch weiter fort, so stellt sich die Reflexion wieder ein, die Intensität des von demselben reflectirten Lichtes nimmt wieder zu und wird am grössten, wenn man den oberen Spiegel überhaupt um 180° gedreht hat,

Fig. 92.

d c b a

wo dann seine Reflexionsebene mit der des unteren Spiegels wieder zusammen fällt. Von hier an nimmt bei fortgesetzter Drehung des oberen Spiegels das von ihm reflectirte Licht wieder ab, so dass es bei 270°, wo die Reflexionsebenen beider Spiegelflächen wieder aufeinander senkrecht stehen, ganz unmerklich ist. So oft also die Reflexionsebenen beider Spiegelflächen zusammenfallen, wird der Strahl *bc*, der vom untern Spiegel unter einem Winkel von 35° 25′ reflectirt wird und unter diesem Winkel auch auf den zweiten Spiegel fällt, vom letzteren vollständig reflectirt, dagegen vollständig durchgelassen oder, falls die Rückseite dieses Spiegels geschwärzt ist, absorbirt, wenn die Reflexionsebenen beider Spiegel sich rechtwinklig kreuzen.

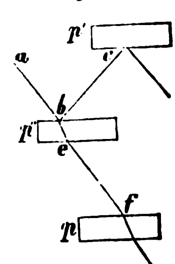
So hat also der Lichtstrahl *bc* durch seine Reflexion von der unteren Glasplatte eine gewisse Eigenthümlichkeit erlangt, die ihn von einem gewöhnlichen Lichtstrahle unterscheidet; denn dieser zeigt bei seiner Reflexion von einer spiegelnden Oberfläche unter sonst gleichen Umständen nicht jenen Wechsel der Intensität, wie ein Strahl, der gleich *bc* unter dem angegebenen Winkel von einer Glasplatte reflectirt ist. — Man nennt nun einen Lichtstrahl von der beschriebenen Beschaffenheit einen durch Reflexion polarisirten, und eine durch die Strahlen *ab* und *bc* gelegte Vertikalebene, die mit der Einfalls- und Reflexionsebene des unteren Spiegels zusammenfällt, gewöhnlich die Polarisationsebene.

96. Nach den früher dargelegten Principien der Undulationstheorie besteht ein durch Reflexion in der angegebenen Weise polarisirter Lichtstrahl aus Aethertheilchen, deren Schwingungen sämmtlich untereinander parallel, aber senkrecht gegen die Reflexionsebene des unteren Spiegels geschehen. Kurz, der reflectirte Lichtstrahl *bc* ist ein gradlinig polarisirter, dessen Schwingungen alle senkrecht gegen die Reflexionsebene (*abc*, Fig. 92) vor sich gehen. Fällt nun ein solcher Strahl auf den oberen Spiegel des zuvor gedachten Apparates, so wird er reflectirt, wenn die Reflexionsebene dieses Spiegels mit der des unteren zusammenfällt, und daher die Schwingungen des Strahles nicht allein zur unteren, sondern auch zur oberen Reflexionsebene senkrecht geschehen. In diesem Falle sind beide Spiegelflächen untereinander und die Schwingungen des Strahles zur oberen Spiegelfläche parallel. Dreht man aber die letztere, so gewinnt sie gegen die Schwingungsebene des Strahles und ihre Reflexionsebene in Bezug auf

die des unteren Spiegels eine andere Lage. Nach einer Drehung von 90° stehen die Reflexionsebenen beider Spiegel aufeinander senkrecht; die Schwingungen des Strahles *bc*, noch immer senkrecht gegen die Reflexionsebene des unteren Spiegels, geschehen jezt nicht mehr senkrecht gegen die Reflexionsebene des oberen Spiegels, sondern in derselben. Diese Schwingungen sind auch nicht mehr parallel zur spiegelnden Oberfläche des zweiten Spiegels; sie gehen jetzt durch die Glasplatte hindurch, falls nicht etwa die Rückseite der letzteren geschwärzt ist und eine Absorption bewirkt. Dreht man weiter bis 180°, so stellt sich der Parallelismus der Schwingungen zur Spiegelfläche der oberen Glasplatte wieder allmälig her. Ist die Drehung der letzteren bis zu 180° vollzogen, so fallen die Reflexionsebenen beider Spiegelflächen zusammen und die Schwingungen des Strahles *bc* geschehen wieder senkrecht gegen beide Reflexionsebenen, also parallel zur Oberfläche des zweiten Spiegels. Jetzt findet wieder ein Maximum der Reflexion statt. Bei einer ferneren Drehung des oberen Spiegels von 180° bis 270° verhält es sich aber ebenso wie bei einer Drehung von 0° bis 90°, so dass also bei 270° ein Minimum der Reflexion statt hat. Die Drehung von 270° bis zur parallelen Anfangsstellung beider Spiegel wiederholt endlich den Vorgang, der durch die Drehung von 90° bis 180° bedingt ist.

97. Nun sind aber nicht allein die von einer durchsichtigen Glasplatte reflectirten, sondern auch die durch dieselbe hindurchgegangenen, gebrochenen Strahlen polarisirt, obgleich in einem anderen Sinne, d. h. in einer anderen Ebene, als jene. Der einfallende gewöhnliche Lichtstrahl *ab* zerfällt in den reflectirten *bc* und in den gebrochenen *be*, der parallel mit *ab* aus der von parallelen Ebenen begrenzten Glasplatte *p''* hervortritt. Fällt nun der durchgelassene Strahl *ef* auf eine zweite mit der vorigen parallele Glasplatte *p*, so wird er durch diese hindurchgehen. Dreht man aber die Platte *p* um den Strahl *ef* als Axe, ohne sonst ihre Neigung gegen denselben zu ändern, so verändert sich die Intensität des durchgelassenen Lichtes, bis bei einer Drehung von 90° ein Minimum eintritt, indem der Strahl *ef* bei dieser Stellung der Platte *p* von ihr reflectirt wird.

Fig. 93.



Die Erscheinung findet nach der Undulationstheorie ihre Erklärung darin, dass der gebrochene Strahl, obschon gradlinig wie der reflectirte polarisirt, doch aus Schwingungen besteht, die in der Reflexions- und Brechungsebene der Glasplatte p'' geschehen, während die Schwingungen des reflectirten Strahles senkrecht zu dieser Ebene vor sich gehen. Beide Strahlen, der reflectirte und der gebrochene, bestehen aus gradlinigen Oscillationen, so dass die Oscillationen eines jeden, für sich betrachtet, alle untereinander parallel sind. Allein die Oscillationen des reflectirten Strahles geschehen, rücksichtlich unserer Figur, senkrecht zur Ebene des Papieres, die des gebrochenen, durchgelassenen Lichtstrahles dagegen in dieser Ebene. Die Oscillation beider Strahlen stehen also, miteinander verglichen, aufeinander senkrecht, d. h. beide Strahlen sind aufeinander senkrecht polarisirt; und ihre Polarisations- und Schwingungsebenen durchkreuzen sich demgemäss unter einem rechten Winkel.

Es kann keinem Zweifel unterliegen, dass solche zueinander senkrecht polarisirte Strahlen einen gewissen Gegensatz in der Erscheinung darbieten müssen. Fällt der durch die Platte p'' gegangene Lichtstrahl, dessen geradlinige Schwingungen also senkrecht zu seiner Fortpflanzungsrichtung ef innerhalb der Ebene des Papieres geschehen, auf eine zweite mit der ersten parallele Glasplatte p, so geht er durch diese hindurch. Dreht man aber die Platte p um den Strahl ef in der bezeichneten Weise, so gewinnen seine Schwingungen allmälig eine andere Lage zur Oberfläche dieser Platte. Ist die Drehung der letzteren bis zu 90° fortgeschritten, so sind nun die Oscillationen parallel zur Oberfläche der Glasplatte p, die ihn dann reflectirt. Bei einer ferneren Drehung bis zu 180° wird er wieder durchgelassen, und bei 270° wieder reflectirt. So verhält sich also der durchgelassene Strahl in dem Falle, dass die Platte p um einen Winkel von 90° oder 270° gedreht wird, ebenso wie der reflectirte Strahl bc dann, wenn er auf eine zweite mit der ersten parallelen Glasplatte p' fällt, wo die Reflexionsebenen beider Spiegelflächen (p'' und p') zusammenfallen und die Schwingungen des Strahles bc senkrecht zu diesen Ebenen, aber parallel zur Oberfläche des Spiegels p' sind. Dreht man die Platte p' aus ihrer zu p'' parallelen Anfangsstellung um 90°, so wird der durch Reflexion polarisirte Strahl bc durchgelassen, während der durch Brechung polarisirte Strahl bef von der Platte

p reflectirt wird, wenn man die letztere aus ihrer Anfangsstellung gleichfalls um 90° dreht.

Der Gegensatz zwischen den Strahlen *bc* und *ef* besteht hiernach darin, dass eine zweite Platte unter den angeführten Umständen den einen Strahl am besten reflectirt, wenn sie den anderen am reichlichsten durchlässt. Und diese Verschiedenheit ist darin begründet, dass die Schwingungen beider Strahlen zueinander senkrecht sind.

98. Wenn also ein gewöhnlicher Lichtstrahl, dessen Schwingungen nach allen möglichen auf ihm senkrechtstehenden Richtungen geschehen können, unter einem bestimmten Winkel auf eine durchsichtige Substanz fällt, so werden seine Schwingungen im Acte der Reflexion und Brechung auf zwei Wellensysteme zurückgeführt, von denen das eine, welches den reflectirten Strahl bildet, aus Schwingungen, senkrecht zur Reflexionsebene, besteht, während das andere, welches den gebrochenen Strahl ausmacht, durch Schwingungen bedingt ist, die in der bezeichneten Ebene stattfinden.

Für jede Substanz gibt es nun einen bestimmten Winkel, bei dem die Polarisation des Lichtes am vollständigsten bewirkt wird, so dass die beiden durch Reflexion und Brechung gesonderten Strahlen den grössten Gegensatz darbieten. Diesen Winkel nennt man den Polarisationswinkel, der z. B. für Glas 35° 25′ beträgt. Je mehr der Winkel, unter dem ein gewöhnlicher Lichtstrahl auf Glas fällt, von dem eben angeführten abweicht, desto geringer erscheint unter sonst gleichen Umständen die Polarisation des Lichtes. Allein die letztere ist auch dann noch unvollkommen, wenn ein Lichtstrahl unter dem sog. Polarisationswinkel auf eine einzige dünne Glasplatte fällt, namentlich gilt dieses für die Polarisation des gebrochenen Strahles. Doch lässt sich der Polarisationszustand steigern, wenn man statt einer einfachen Glasplatte ein ganzes System von parallelen dünnen Glasplatten, d. h. einen sog. Glassatz anwendet, durch welches das Licht eine wiederholte Brechung erfährt. Auch kann das theilweise polarisirte Licht durch öftere Reflexion unter einem und demselben Winkel, selbst wenn dieser vom Polarisationswinkel abweicht, dem vollkommenen Polarisationszustande in Bezug auf eine bestimmte

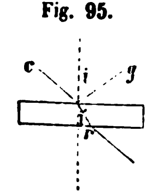
Ebene immer näher gebracht werden.*) Das theilweise polarisirte Licht ist ein Gemisch aus vollständig polarisirten und gar nicht polarisirten Strahlen, welche letztere aber auf die bezeichnete Weise ebenfalls in den Polarisationszustand übergeführt werden können.

Endlich fand Brewster**) auf dem Wege vergleichender Versuche noch eine interessante Relation zwischen dem Polarisationswinkel und dem Brechungsverhältnisse der polarisirenden Substanz. Bezieht man nämlich den Polarisationswinkel auf das Einfallsloth, so ist die Tangente dieses Winkels gleich dem Brechungsverhältniss. Sei das letztere durch n und der bezügliche Einfallswinkel bei vollständiger Polarisation durch x bezeichnet, so hat man $\tan x = n$. Nun ist aber auch, wenn man den zugehörigen Brechungswinkel y nennt, $n = \frac{\sin x}{\sin y}$, daher $\sin x = n . \sin y$ und, da wegen $\tan x = n$ auch $\frac{\sin x}{\cos x} = n$, $\cos x = \sin y$, woraus folgt, dass $x + y = 90^0$ ist. D. h. in Worten: Für den Winkel vollständiger Polarisation stehen der gebrochene und der reflectirte Strahl aufeinander senkrecht. Und so kann man denn auch aus dem Brechungsverhältnisse den Winkel vollkommener Polarisation und umgekehrt aus diesem jenes finden.

Fig. 94.

99. Die oben (§. 95 ff.) hervorgehobenen Sätze über die Reflexion eines geradlinig polarisirten Lichtstrahles lassen sich mit Hilfe der Rechnung näher begründen. Gestützt auf die Principien der Undulationstheorie lassen sich Formeln für die Intensität aufstellen, womit das in einem bestimmten Sinne geradlinig polarisirte Licht von einem homogenem Medium (wie Glas, Wasser) unter den angeführten Umständen reflectirt wird. Gesetzt, c (in nebenst. Figur) sei nicht ein gewöhnlicher (unpolarisirter), sondern ein bereits geradlinig polarisirter Lichtstrahl, der auf die Oberfläche eines homogenen Mediums, etwa auf eine Glasplatte falle. Die Vibrationsintensität dieses Strahles wird dann beim

Fig. 95.



*) S. Brewster: Philos. Transact. 1830. pg. 69; Poggend. Ann. Bd. XIX. S. 259.

**) Philos. Transact. for 1815. pg. 126.

Uebergange in das neue Medium in zwei andere zerlegt, von denen die eine in dem ersten Medium (Luft) den reflectirten Strahl g, die andere den gebrochenen r erregt. Fresnel erhielt nun für die Intensität des reflectirten Strahles, wenn die Schwingungsintensität des einfallenden $= 1$ gesetzt wird und die Schwingungen senkrecht gegen die Einfalls- und Reflexionsebene geschehen, die Formel: $\frac{\sin^2.(i-i')}{\sin^2.(i+i')}$, worin i den Einfallswinkel und i' den Brechungswinkel bezeichnet. Ist dagegen der Strahl e senkrecht gegen die Einfallsebene polarisirt, wo also die Schwingungen selbst in dieser Ebene geschehen, so findet die Intensität des reflectirten Lichtes ihren Ausdruck in der Formel: $\frac{\tang^2.(i-i')}{\tang^2.(i+i')}$.

Dieser Ausdruck erhält für $i + i' = 90^0$ den Werth 0; d. h. wenn der gebrochene Strahl r auf dem reflectirten g senkrecht steht, wo dann eben $i + i' = 90^0$ ist, so findet gar keine Reflexion, sondern nur Brechung statt, indem der einfallende Strahl durchgelassen wird. Und dies geschieht gerade, wenn der senkrecht gegen die Reflexionsebene polarisirte Strahl c unter dem sog. Polarisationswinkel einfällt.

Blicken wir nun hier zurück auf die oben (§. 95, 96 u. 97) erläuterten Fälle. Leitet man den geradlinig polarisirten Strahl ef (Fig. 93 S. 165), dessen Schwingungen in der Einfallsebene geschehen, auf eine zur polarisirenden Platte p'' parallel gelegten p, so wird derselbe von dieser Platte ohne Reflexion durchgelassen. Denn in diesem Falle fällt der Strahl ef, der parallel mit dem Strahle ab aus p'' hervortritt, unter dem Polarisationswinkel auf die Platte p, so dass die Intensität des reflectirten Lichtes nach dem Vorstehenden $= 0$ ist. Dagegen geschehen die Schwingungen des reflectirten Strahles bc senkrecht gegen die Einfalls- oder Reflectionsebene (abc). Dieser Strahl wird von einer zweiten Platte p', die parallel mit p gelegt ist, reflectirt. Dreht man aber die Platte p' um 90^0, so geschehen die Schwingungen des Strahles bc nicht mehr senkrecht zur Einfalls- und Reflexionsebene der Platte p', sondern in dieser Ebene, und es verhält sich hier ebenso, wie mit dem Strahle ef bei dem Parallelismus der Platten p und p'', d. h. der Strahl bc wird von der Platte p' ganz durchgelassen. Dreht man dagegen die Platte p um 90^0, so werden die Schwingungen des Strahles ef parallel mit ihrer Oberfläche, und dieser

Strahl verhält sich nun so wie der Strahl bc bei dem Parallelismus der Platten p'' und p', d. h. er wird reflectirt.

100. Da der sog. Polarisationswinkel nicht nur für verschiedene Substanzen, sondern auch bei einer und derselben Substanz für jede homogene Farbe ein anderer ist, so folgt daraus, dass weisses Licht als ein Gemisch aller möglichen Farbestrahlen, d. h. Aetherwellen von verschiedener Schwingungsdauer, nie ganz vollständig polarisirt sein kann. Doch lässt sich schon nach dem Vorstehenden erwarten, dass das von den Körpern reflectirte Licht in den meisten Fällen mehr oder minder polarisirt sein müsse. Und in der That hat man solches Licht fast immer bis zu einem gewissen Grade polarisirt gefunden, im Gegensatze zu dem Lichte selbstleuchtender Körper, das sich als gewöhnliches (unpolarisirtes) darstellt. So ist das reflectirte blaue Licht des Himmels polarisirt, das von der Sonne direct kommende aber unpolarisirt. Indessen sei hier noch bemerkt, dass polarisirtes Licht seine Eigenthümlichkeit verliert, d. h. depolarisirt wird, wenn es auf eine rauhe Fläche fällt und von dieser eine Zerstreuung nach allen Richtungen erfährt. Will man nun erfahren, ob gegebenes Licht polarisirt sei oder nicht, so kann man ein Turmalinplättchen benutzen, dessen Oberflächen parallel mit seiner krystallographischen Hauptaxe geschliffen sind. Untersucht man z. B. das von einer Glasplatte reflectirte Licht durch ein solches Plättchen, indem man durch das letztere nach jener hinsieht, so werden die vom Plättchen aufgefangenen Strahlen durch dasselbe hindurchgehen, wenn seine Axe senkrecht zur Reflexionsebene der Glasplatte oder, was dasselbe, senkrecht zur Polarisationsebene des vom Glase kommenden Lichtes ist; dagegen wird dieses Licht verschwinden, d. h. von dem Turmalinplättchen absorbirt werden, wenn die Axe des letzteren mit jener Polarisationsebene zusammenfällt. Im ersten Falle sind nun die Schwingungen der reflectirten Lichtstrahlen parallel zur Axe des Plättchens, im zweiten aber senkrecht zu derselben, woraus zu entnehmen ist, dass das Turmalinplättchen nur die mit seiner Axe parallelen Schwingungen hindurchlässt, was ohne Zweifel mit der Gruppirung des Aethers um seine Massentheilchen und demgemäss wohl auch mit der Elasticität des Aethers nach gewissen Richtungen hin in nächster Beziehung steht. So wird also ein Körper, der polarisirtes Licht aussendet, durch ein derartiges Turmalinplättchen abwechselnd hell und dunkel erscheinen, je

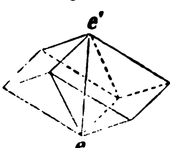
nachdem die Schwingungen der Strahlen parallel oder senkrecht zur Axe des Krystalls geschehen. Man ersieht hieraus, wie das Turmalinplättchen zur Erkennung des polarisirten Lichtes gebraucht werden kann. Das zu untersuchende Licht ist polarisirt, wenn es während der Drehung des Plättchens (vor dem Auge) in dem Moment verschwindet, wo die Axe eine senkrechte Stellung zu den Schwingungen der Strahlen hat. Erscheint z. B. der Himmel, wenn man ihn durch ein Turmalinplättchen betrachtet, beim Drehen des letzteren bald hell und bald dunkel, so ist das innerhalb der Atmosphäre reflectirte Licht als polarisirt anzusehen. Auch lässt sich die Lage der Axe in einem Turmalinplättchen, falls dieselbe unbekannt sein sollte, leicht durch einen Versuch bestimmen. Man hält nämlich das Plättchen gegen eine spiegelnde Oberfläche und giebt ihm durch Drehung um eine auf seiner Ebene senkrechte Linie eine solche Stellung, dass es kein Licht durchlässt. Dann liegt die optische Axe des Krystalls in der Reflexionsebene des von der spiegelnden Oberfläche kommenden Lichtes.

Legt man zwei Turmalinplättchen, die beide parallel mit ihrer Axe geschliffen sind, so aufeinander, dass ihre Axen miteinander parallel laufen, so lassen sie das einfallende Licht durch, dergestalt, als ob beide nur ein einziges von doppelter Dicke bildeten. Dagegen verschwindet das Licht, wenn beide Plättchen so aufeinander liegen, dass ihre Axen senkrecht aufeinander stehen. Ist daher das eine Plättchen fest und das andere drehbar, so wird beim Drehen des letzteren das Gesichtsfeld abwechselnd hell und dunkel erscheinen. Ein solches System zweier Turmalinplättchen bildet einen sehr einfachen Polarisationsapparat. Das eine Plättchen, auf welches gewöhnliches Licht fällt, setzt dieses in geradlinig polarisirte Strahlen um, die von dem anderen Plättchen, je nach der Stellung seiner Axe zu der des ersten, entweder durchgelassen oder absorbirt werden. — Uebrigens sind nicht alle Turmaline zu Polarisationsversuchen gleich geeignet, am meisten die ledergelben und grünen brasilianischen. Neuerdings hat man dieselben ihrer Kostspieligkeit wegen durch den sog. Herapathit, ein von Herapath dargestelltes Jodchininsalz*) zu ersetzen gesucht.

*) Philos. Magaz. 1852. III. N. 17. p. 161. — Poggend. Ann. Bd. LXXXIX. S. 182., Bd. XC. S. 616; Dingler's polytechn. Journ. Bd. CXXXIV. S. 370.

101. Fällt ein Lichtstrahl unter irgend einem Winkel auf einen Krystall, der nicht zu dem regulären Systeme gehört, dessen Krystallform also kein Würfel, kein reguläres Octaëder, u. s. w. ist, so wird derselbe meist in zwei Strahlen zerlegt, die den Krystall in verschiedenen Richtungen durchlaufen; daher man einen Gegenstand durch einen solchen Krystall fast in allen Lagen doppelt sieht. In auffallender Weise bemerkt man diese Erscheinung namentlich am isländischen Kalkspath (krystallisirtem kohlensauren Kalk), an dem dieselbe auch zuerst beobachtet wurde. Die Kerngestalt des Kalkspathes, der nach drei Richtungen vollkommen spaltbar ist, erscheint als ein Rhomboëder. Die beiden gegenüberliegenden Ecken *e*, *e'* desselben werden von drei gleichen stumpfen Winkeln gebildet, deren Ebenen gleiche Neigung zu einander haben, während an den übrigen Ecken zwei gleiche spitze Winkel mit einem stumpfen zusammenstossen. Denkt man sich durch die stumpfen Ecken *e*, *e'* und zwei parallele Kanten eine Ebene gelegt, so heisst diese der Hauptschnitt des Krystalls und die Diagonale *ee'* dieses Schnittes, welche die Ecken *e*, *e'* miteinander verbindet, die optische Axe.

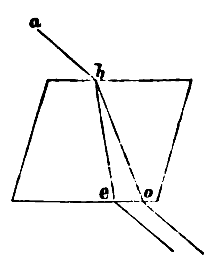
Fig. 96.



Die letztere bildet mit den Kanten der stumpfen Ecken gleiche Winkel und hat gegen alle Seitenflächen gleiche Neigung. Da man sich nun den ganzen Krystall aus lauter der Kerngestalt ähnlichen Massentheilchen zusammengesetzt denken kann, so kommt jedem Massentheilchen ein Hauptschnitt und eine Axe zu, und zwar so, dass alle diese Hauptschnitte und Axen in gleichem Sinne angeordnet sind. Dieselben sind alle unter einander und zu dem Hauptschnitte und der Axe des ganzen Krystalls parallel.

Trifft ein Lichtstrahl in einer Hauptschnittsebene auf die Fläche eines Kalkspathes, so entstehen in diesem zwei Strahlen *be* und *bo*, die an der gegenüberliegenden Fläche in parallelen Richtungen hervortreten. Der eine von diesen Strahlen richtet sich ganz nach dem gewöhnlichen Brechungsgesetze, insofern bei ihm das Verhältniss zwischen dem Sinus des Einfallswinkels und dem Sinus des Brechungswinkels stets constant bleibt. In welcher Richtung dieser Strahl auch den Krystall

Fig. 97.



durchlaufen mag, sein Brechungsexponent ist immer derselbe. Aus diesem Grunde nennt man ihn den gewöhnlich gebrochenen (ordentlichen) Strahl, im Gegensatze zu dem anderen, der dem gewöhnlichen Brechungsgesetze nicht unterworfen ist. Der Brechungsexponent des letzteren ist je nach seiner Richtung veränderlich; daher nennt man ihn den ungewöhnlich gebrochenen (ausserordentlichen) Strahl.

Gibt man dem Krystall durch Schleifen zwei zur Axe senkrechte Oberflächen, so geht ein Lichtstrahl, der senkrecht auf eine dieser Oberflächen, also parallel zur Axe, einfällt, ungebrochen durch den Krystall hindurch. Fällt aber der Lichtstrahl schief auf, so wird er doppelt gebrochen. Der gewöhnlich gebrochene Strahl liegt dann der Axe näher als der ausserordentliche; aber beide liegen mit dem einfallenden Strahle und dem Einfallslothe in einer und derselben Ebene. Schneidet man den Krystall so, dass er zwei mit der Axe parallele Oberflächen erhält, und fällt ein Lichtstrahl dergestalt auf eine dieser Flächen, dass die Einfallsebene auf der Axe senkrecht steht, so liegt der ausserordentliche wie der ordentliche Strahl in der verlängerten Einfallsebene und sein Brechungsexponent ist = 1,4833, d. h. der Sinus des Einfallswinkels verhält sich zum Sinus des Brechungswinkels wie 1,4833 : 1 oder wie 1 : 0,6742. Für den gewöhnlich gebrochenen Strahl besteht aber das Verhältniss 1,6543 : 1 oder 1 : 0,6045.

102. Da nun nach den Principien der Undulationstheorie der Brechungsexponent nichts anderes ist als das Verhältniss der Geschwindigkeiten, mit welchen eine Aetherwelle sich in verschiedenen Medien (hier Luft und Kalkspath) fortpflanzt, so muss sich der ordentliche Strahl, weil sein Brechungsexponent immer derselbe ist, nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit, dagegen der ausserordentliche, wie die Veränderlichkeit seines Brechungsexponenten andeutet, nach verschiedenen Richtungen mit ungleicher Geschwindigkeit durch den Krystall bewegen.

Der ordentliche und ausserordentliche Strahl verhalten sich nun ganz so wie zwei geradlinig und senkrecht auf einander polarisirte Strahlen, wie man sofort findet, wenn man sie beide, bezüglich ihrer Reflexion und Brechung in anderen geeigneten Medien, mit einander vergleicht. Die Polarisationsebene des ordentlichen Strahles fällt zusammen mit der Ebene des Hauptschnittes, während die des ausserordentlichen auf derselben senkrecht steht,

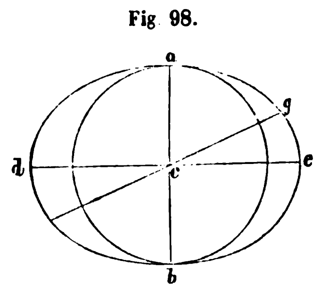
d. h. in der Sprache der Undulationstheorie: die Schwingungen des gewöhnlichen Strahles geschehen senkrecht gegen die Ebene des Hauptschnittes, die des ausserordentlichen dagegen in dieser Ebene.

103. Während die Elasticität des Aethers in optisch homogenen Medien, die das Licht einfach brechen, wohl nach allen Richtungen als constant anzunehmen ist, ist sie in Krystallen, die nicht zum regulären System gehören, nach verschiedenen Richtungen ungleich. Bei dem Kalkspath und allen anderen Krystallen, die das Licht in ähnlicher Weise wie er doppelt brechen, besteht eine Verschiedenheit in der Elasticität des Aethers nach zwei aufeinander senkrechten Hauptrichtungen, und zwar, wegen der symmetrischen Anordnung der Massentheilchen in Bezug auf die Hauptaxe, so, dass die Elasticität des Aethers nach jeder auf dieser Axe senkrechten Richtung constant ist. Schwingen nun die Aethertheilchen, welche den ordentlichen Strahl bilden, senkrecht zur optischen Axe, oder zum Hauptschnitt, worin dieselbe liegt, so muss sich dieser Strahl nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit durch den Krystall fortpflanzen, da seine Schwingungen immer senkrecht zum Hauptschnitt bleiben. Hingegen wird die Geschwindigkeit des ausserordentlichen Strahles, dessen Schwingungen parallel mit dem Hauptschnitte geschehen, von der Richtung abhängen, nach welcher er den Krystall durchläuft. Bewegt sich derselbe senkrecht zur optischen Axe durch den Krystall, so geschehen seine Schwingungen gerade parallel mit dieser Axe; und in diesem Falle findet zwischen den Geschwindigkeiten beider Strahlen die grösste Differenz statt. Dagegen ist die Geschwindigkeit des ausserordentlichen Strahles um so weniger von der Geschwindigkeit des ordentlichen verschieden, je mehr sich seine Richtung der optischen Axe nähert, weil dann auch der Winkel, den seine Schwingungen mit der ebengenannten Axe machen, einem rechten um so näher kommt. Bewegt sich endlich der ausserordentliche Strahl in der Richtung der optischen Axe selbst durch den Krystall, so ist seine Geschwindigkeit gleich der des ordentlichen Strahles, d. h. es findet in diesem Falle, der Erfahrung gemäss, keine doppelte Brechung statt.

Bezeichet ab die Richtung der optischen Axe im Kalkspath, $ca = cb$ die Geschwindigkeit des ordentlichen und $cd = ce$ die des ausserordentlichen Strahles, so drückt die Ellipse $adbe$ das Gesetz

aus, nach welcher sich die Geschwindigkeit des letztgenannten Strahles (im Krystalle) mit seiner Richtung ändert. In der Richtung der optischen Axe *ab* ist die Geschwindigkeit für beide Strahlen, wie schon bemerkt, dieselbe, für jede andere Richtung aber, die mit der Axe *ab* einen bestimmten Winkel bildet, ergibt sich die Geschwindigkeit des ausserordentlichen Strahles, wenn man unter dem gegebenen Winkel vom Mittelpunkte der Ellipse an bis zum Umfange der letzteren eine Linie *cg* zieht. Die Länge dieser Linie bezeichnet die Geschwindigkeit des ausserordentlichen Strahles in dieser Richtung. Seine Geschwindigkeit erreicht den grössten Werth, falls er mit der optischen Axe einen rechten Winkel macht; dann ist dieselbe durch die grosse Axe *ce* der Ellipse gegeben. Da nun die Geschwindigkeit der ordentlichen Strahlen nach allen Richtungen dieselbe ist, so lässt sie sich durch den Radius eines Kreises ausdrücken, der um *c* beschrieben ist. Denkt man sich endlich die ganze Figur um die Axe *ab* gedreht, so geht aus der Umdrehung des Kreises eine Kugel und aus der Umdrehung der Ellipse ein Ellipsoid hervor. Die Kugel entspricht der Wellenfläche der gewöhnlichen, das Ellipsoid der Wellenfläche der ausserordentlichen Strahlen. Die Wellenfläche ist aber diejenige krumme Oberfläche, bis zu welcher das von einem Punkte im Krystalle nach allen Seiten sich verbreitende Licht gleichzeitig gelangt, oder mit anderen Worten, der geometrische Ort der gleichzeitigen Ankunft aller betreffenden Oscillationen am Ende der Zeiteinheit. — Fällt nun auf die Fläche eines Kalkspathes eine Reihe von Aetherwellen, so verbreiten sich von jedem Punkte dieser Fläche sowohl kugelförmige als ellipsoidische Wellen ins Innere des Krystalls. Die kugelförmigen Wellen bilden dann das gewöhnlich gebrochene, die anderen das ungewöhnlich gebrochene Licht. Die ellipsoidische Wellenfläche hüllt hier die kugelförmige ganz ein, weil die ausserordentlichen Strahlen sich im Kalkspathe schneller als die ordentlichen bewegen. Dies kommt aber daher, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtstrahlen durch die Elasticität des Aethers in der Richtung bedingt ist, worin die Schwingungen geschehen. Ist nun die Elasticität des Aethers nach der

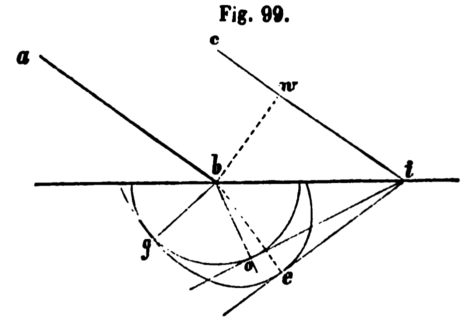
Fig. 98.



Richtung der Hauptaxe grösser als in allen anderen Richtungen, am kleinsten dagegen für alle Richtungen, die auf der genannten Axe senkrecht sind, so müssen sich die ausserordentlichen Strahlen, deren Schwingungen parallel mit der Axe (oder dem Hauptschnitte) geschehen, rascher fortpflanzen als die ordentlichen, für welche die Schwingungen senkrecht zur optischen Axe stattfinden.

104. Man kann nun die Richtung der beiden gebrochenen Strahlen, nämlich des ordentlichen und ausserordentlichen, welche den zuvor (§. 103) bezeichneten Aetherwellen entsprechen, durch eine einfache bereits von Huyghens gegebene Construction bestimmen. Sei *ab* ein in *b* auf den Krystall fallender Lichtstrahl. Man ziehe *ci* parallel mit *ab* und *bw* senkrecht auf *ci*. Dann kann *wi* die Geschwindigkeit des Lichtes in der Luft bezeichnen. Während

Fig. 99.



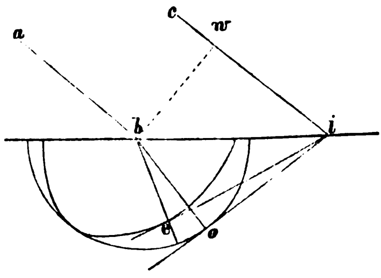
sich nämlich ein Aetherwellensystem in der Luft von *w* nach *i* fortpflanzt, werden sich vom Punkte *b* aus sphärische und ellipsoidische Aetherwellen innerhalb des Kalkspathes verbreiten. Nun verhält sich aber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in der Luft zu der im Kalkspathe, und zwar in der Richtung der Hauptaxe wie 1,6543 : 1 oder, wenn man die Geschwindigkeit *wi* des Lichtes, in der Luft als Einheit nimmt, wie 1 : 0,6045. Man beschreibe nun um *b* einen Kreis, dessen Halbmesser zur Linie *wi* in dem eben angegebenen Verhältnisse steht, und ziehe von *i* aus an den Kreis eine Tangente, so stellt die von *b* nach dem Berührungspunkte gezogene Gerade *bo* die Richtung des gewöhnlich gebrochenen Strahles vor (§. 74). Hierauf construire man auch um *b* als Mittelpunkt eine Ellipse, deren kleine Halbaxe *bg* sich zu *wi* wie 0,6045 : 1 verhält, während ihre auf *bg* senkrechte grosse Halbaxe mit $wi = 1$ das Verhältniss 0,6742 : 1 bildet, durch welches die Geschwindigkeit des Lichtes im Kalkspath senkrecht

auf die optische Axe im Vergleich zu der in der Luft gegeben ist. Zieht man dann vom Punkte *i* eine Tangente an die Ellipse, so ist die vom Einfallspunkte an den Berührungspunkt gezogene Linie *be* die Richtung des ausserordentlichen Strahles.

Indessen beibt dieser Strahl nicht mit dem ordentlichen in der Einfallsebene des Strahles *ab*, wenn die letztere nicht, wie zuvor angenommen, mit der Ebene des Hauptschnittes parallel ist, wie denn auch in diesem Falle die optische Axe *bg* ausserhalb der Einfallsebene liegt. Doch kann man hier, um die Richtung des ausserordentlichen Strahles zu gewinnen, zunächst wie im vorigen Falle verfahren, d. h. man beschreibt in der Einfallsebene um den Punkt *b* einen Kreis und dann in irgend einer durch die Axe *bg* gelegten Ebene eine Ellipse auf die angegebene Weise. Durch Drehung dieser Ellipse um *bg* entsteht die ellipsoidische Wellenfläche. Denkt man sich nun in *i* auf der Einfallsebene des Strahles *ab* eine Senkrechte errichtet und durch diese eine berührende Ebene an die ellipsoidische Wellenfläche gelegt, so stellt die von *b* nach dem Berührungspunkte der Ebene und des Ellipsoids gezogene Gerade die Richtung des ungewöhnlich gebrochenen Strahles vor.

In ganz ähnlicher Weise wie im Kalkspath geschieht die doppelte Brechung in allen Krystallen, die zum tetragonalen und hexagonalen Systeme gehören, nur mit dem Unterschiede, dass sich in einigen der ordentliche, in anderen der ausserordentliche Strahl schneller bewegt. Krystalle, für welche, wie im Kalkspath, der Brechungsexponent des ordentlichen Strahles grösser ist als derjenige des ausserordentlichen, nennt man n e g a t i v e (auch a b s t o s s e n d e), solche dagegen, bei welchen der Brechungsexponent des ausserordentlichen Strahles grösser als der des ordent-

Fig. 100.



lichen ist, positive (auch anziehende) Krystalle. Bei den negativen Krystallen wird der ausserordentliche Strahl scheinbar von der optischen Axe abgestosen, bei den positiven hingegen scheinbar angezogen. Dort entsteht die Wellenfläche der ausserordentlichen Strahlen durch Umdrehung der Ellipse um ihre kleine Axe (Fig. 98), hier durch Drehung derselben Ellipse um ihre grosse Axe, und die ellipsoidische Wellenfläche wird von der kugelförmigen der ordentlichen Strahlen ganz eingehüllt.

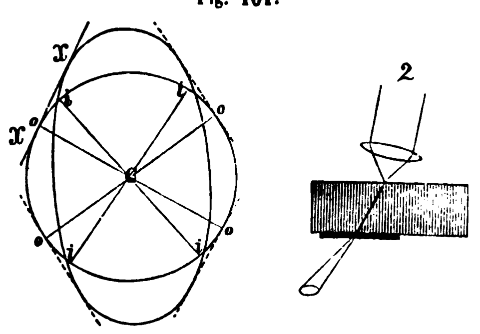
In allen diesen Krystallen, die man einaxige nennt, fällt die optische Axe stets mit der krystallographischen Hauptaxe zusammen.

105. Obwohl nun auch in Krystallen, die zum rhombischen (ein- und einaxigen), monoklinischen (zwei- und eingliedrigen) und triklinischen (ein- und eingliedrigen) System gehören, eine doppelte Brechung stattfindet, so folgt doch keiner der beiden Strahlen, in welche der einfallende zerlegt wird, dem gewöhnlichen Brechungsgesetze. Für solche Krystalle gibt es im Grunde keinen gewöhnlich gebrochenen Strahl. Dagegen haben dieselben zwei Axen oder Linien, in denen keine doppelte Brechung vorkömmt; daher sie auch im Gegensatze zu den oben (§. 104) betrachteten Krystallen zweiaxige genannt werden. In diesen gibt es keine Richtung, um welche herum die Elasticität des Aethers, wie in den einaxigen Krystallen, gleichmässig ist, und deshalb auch keine kugelförmigen Aetherwellen. Vielmehr ist in ihnen die Elasticität des Aethers nach drei aufeinander senkrechten Richtungen (Elasticitätsaxen) verschieden, und auch die Wellenfläche der gebrochenen Strahlen hier kein Umdrehungsellipsoid, sondern nach Fresnel eine aus zwei Abtheilungen zusammengesetzte Fläche von der Art, dass ihr Durchschnitt mit einer Ebene, die durch je zwei jener Elasticitätsaxen geht, aus einem Kreise und einer Ellipse besteht.

Nun können die Schwingungen der Strahlen, welche den zweiaxigen Krystall in irgend einer Richtung durchlaufen, mit irgend einer der drei Elasticitätsaxen parallel sein, wo dann die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elasticität des Aethers in der Richtung der betreffenden Axe entspricht. Von besonderem Interesse ist der Durchschnitt der Wellenfläche mit einer Ebene, welche durch die Axe der grössten und kleinsten Elasticität geht. Der Halbmesser des Kreises ist hier kleiner als die grosse und grösser als die kleine Hauptaxe der Ellipse, so dass der Kreis und die Ellipse

sich in vier diametral gegenüberliegenden Punkten schneiden müssen. (Fig. 101, N. 1). Zieht man nun an den Kreis und an die

Fig. 101.



Ellipse eine gemeinschaftliche Tangente xx, so sind die durch den Mittelpunkt c senkrecht auf die Tangente gezogenen Geraden oo die optischen Axen, von denen man hier die sehr naheliegenden sog. scheinbaren optischen Axen ii, die man auch die Axen der conischen Brechung nennt, zu unterscheiden hat. In der Nähe der Endpunkte dieser Axen, also an den Durchschnittspunkten des Kreises und der Ellipse, zeigt die Wellenfläche trichterförmige Vertiefungen, die Hamilton näher untersucht hat. Diese Vertiefungen laufen in den Punkten i in Spitzen aus und hier lässt sich an die Wellenfläche eine unendliche Anzahl von Berührungsebenen legen, deren jede einem besonderen austretenden Strahle entspricht, d. h. ein Lichtstrahl, der in der Richtung ci den Krystall durchläuft, löst sich beim Austritte in eine zahllose Menge von Strahlen auf, die zusammen in der Oberfläche eines Kegels liegen.

Dies nun eben nennt man die conische Brechung, und zwar im Gegensatze zu einer anderen, aber ähnlichen die äussere conische Brechung.

Die Richtigkeit dieser theoretischen Ableitung Hamilton's bestätigte Lloyd durch den Versuch.*) Der letztere nahm nämlich eine Arragonitplatte, deren Flächen senkrecht zur Halbirungslinie der beiden optischen Axen geschliffen waren, liess durch eine Linse (Fig. 101, N. 2) Sonnenstrahlen auf einen Punkt der einen

*) Vrgl. Poggend. Ann. Bd. XXVIII. S. 91.

Fläche convergiren und verschob auf der anderen Fläche ein Metallplättchen mit einer feinen, kreisrunden Oeffnung dergestalt, dass die Verbindungslinie des Brennpunktes der Linse und der Oeffnung mit einer optischen Axe zusammenfiel. Hier traf also das Sonnenlicht in einem kegelförmigen Bündel auf den Krystall, aus dem es an der entgegengesetzten Seite, der theoretischen Folgerung gemäss, als ein Strahlenkegel hervortrat, so dass das Auge in der geeigneten Richtung gehalten, einen leuchtenden Ring erblickte.

Wenn man nun ferner durch die Tangente xx (Fig. 101), senkrecht auf den Schnitt, der den Kreis und die Ellipse enthält, eine Berührungsebene an die Wellenfläche legt, so wird diese von jener in einer unendlichen Anzahl von Punkten berührt, die in der Peripherie eines Kreises liegen, dessen Ebene die Mündung des Trichters verschliesst; d. h. einem in einer gewissen Richtung einfallenden Strahle entsprechen unzählige gebrochene Strahlen, die auf der Oberfläche eines Kegels liegen, der jenen Berührungskreis zur Basis hat. Fällt also ein Lichtstrahl so auf den Krystall, dass ihm bezüglich der Richtung der gebrochenen Strahlen jene Berührungsebene der Wellenfläche entspricht, so wird er im Krystall in einen hohlen Strahlenkegel aufgelöst, dessen einzelne Strahlen an der anderen Fläche, wenn diese parallel mit der Eintrittsfläche des Lichtes ist, parallel untereinander und mit dem einfallenden Strahle austreten, dergestalt, dass sie einen hohlen Strahlencylinder bilden, dessen Basis dem Querschnitte des Lichtkegels an der Austrittsfläche gleich ist. Diese Brechung nennt man nun nach Hamilton die innere conische Brechung, die Lloyd gleichfalls vermittelst der zuvor erwähnten Arragonitplatte empirisch darthat.

Beiläufig sei hier noch bemerkt, dass die optischen Axen für verschiedene Farbestrahlen bei fast allen zweiaxigen Krystallen nicht dieselbe Richtung haben, sowie auch, dass durch Temperatureinflüsse eine Veränderung in der Lage dieser Axen statt hat. In letzterer Beziehung bietet z. B. der Glauberit die interessante Erscheinung, dass er bei gewöhnlicher Temperatur für violettes Licht einaxig, für die anderen Farben aber zweiaxig ist. Durch Verminderung der Temperatur vergrössert sich der Winkel der optischen Axen für alle Farben und die optische Axe für Violet

theilt sich. Diese Theilung geschieht auch bei Erhöhung der Temperatur, allein in einer auf der vorigen senkrechten Ebene.*)

106. Ist die doppelte Brechung des Lichtes in den betreffenden Krystallen durch eine ungleiche Elasticität des Aethers nach verschiedenen Richtungen bedingt, so lässt sich erwarten, dass selbst optisch homogene Körper von überall constanter Elasticität, also sog. isotrope Körper, durch eine veränderte Gruppirungsweise ihrer Massentheilchen nach einer bestimmten Richtung hin die Eigenschaft der Doppelbrechung erlangen werden. Dies ist nun auch wirklich der Fall. Wenn man nämlich einen optisch homogenen Körper, der das Licht unter gewöhnlichen Umständen einfach bricht, nach einer Richtung zusammenpresst oder auch nur ungleich erwärmt, so wird nicht allein die Elasticität des Körpers selbst, sondern auch die Elasticität des zwischen den Moleculen befindlichen Aethers nach gewissen Richtungen eine andere, womit die Bedingung der doppelten Strahlenbrechung gegeben ist. So erscheint z. B. durch ein rechtwinkliges, vierseitiges Prisma, von etwa 1 Zoll Dicke, wenn man es in der Richtung seiner Axe mittelst einer kleinen eisernen Presse zusammendrückt, eine vorgehaltene Nadelspitze doppelt. Fresnel zeigte die doppelte Brechung des Lichtes an einem Parallelopiped, welches aus 9 Glasprismen zusammengesetzt war. Derselbe legte nämlich auf eine horizontale Ebene zwischen einem eisernen Schraubenstocke vier rechtwinklige Prismen so nebeneinander, dass die rechten Winkel alle nach derselben Seite hinlagen. In die drei von ihnen gebildeten Zwischenräume brachte man drei gleiche, rechtwinklige Prismen, und legte dann noch an jedes Ende ein Prisma von 45°, um aus den neun Prismen ein rechtwinkliges Parallelepiped zu erhalten. Alle Prismen waren zusammengekittet, um Reflexionen des Lichtes an den inneren Oberflächen möglichst zu vermeiden. Nun müsste das Licht durch ein solches Glasparallelopiped geradlinig hindurchgehen, falls die einzelnen Prismen ihren gewöhnlichen Zustand unverändert beibehielten. Setzt man aber die vier erstewähnten Prismen in der Richtung ihrer Längenaxen mittelst des

---

*) Ueber die Fortpflanzung des Lichtes in Krystallen, sowie über die mathematische Ableitung der Undulationstheorie vrgl. Beer, Einleitung in die höhere Optik, Braunsch. 1853; und über die Farbenzerstreuung und das Verhalten des Lichtes in Krystallen auch Fr. Eisenlohr in Poggend. Ann. Bd. CIX. S. 215.

Schraubestockes einem starken Drucke aus, von dem die drei anderen, kürzeren Prismen unberührt bleiben, so sieht man durch das Parallelepiped von einem und demselben Punkte zwei Bilder, die etwa $1^1/_2$ Millimeter von einander entfernt sind. Zu demselben Behufe und mit demselben Erfolge benutzte Guerard eine ähnliche Zusammensetzung aus gekühlten und ungekühlten Glasprismen.

107. Wir haben gesehen (§. 100), dass ein Turmalinplättchen, parallel mit seiner krystallographischen Axe geschnitten, sehr wohl zur Analyse des polarisirten Lichtes geeignet ist. Auch im Turmalin wird ein gewöhnlicher Lichtstrahl in zwei aufeinander senkrecht polarisirte Strahlen zerlegt, deren einer jedoch bei einer gewissen Dicke des Plättchens vollständig verschwindet, so dass es nur die mit seiner Axe parallelen Schwingungen hindurchlässt. Und auf diesem Umstande beruht gerade sein Gebrauch zur Erkennung der Schwingungsrichtung eines polarisirten Lichtstrahles. Zu demselben Behufe kann man aber auch ebensowohl den Kalkspath benutzen, wenn man die Einrichtung so trifft, dass der eine von den beiden Strahlen, in welche ein gewöhnlicher Strahl zerfällt, verschwindet. Dies ist der Fall bei dem sog. Nicol'schen Prisma, das zuerst von dem Engländer Nicol angefertigt wurde. Man schleift nämlich ein Kalkspathrhomboëder, bei dem die Spaltflächen *ab* und *cg* mit den Seitenflächen *ac* und *bg* Winkel von etwa 71° bilden, so ab, dass diese Winkel auf 68° herabkommen, wo dann die neuen Flächen *be* und *ci* senkrecht auf der optischen Axe sein werden. Nun schneidet man das Rhomboëder in *ei* so durch dass die Schnittflächen senkrecht zum Hauptschnitt und zu den Flächen *be* und *ci* stehen. Diese Schnittflächen werden wohl odlirt und dann mittelst Canadabalsam in ihrer natürlichen Lage aneinander gekittet. Endlich pflegt man die vier langen Seitenflächen etwas matt zu schleifen und überdies noch mit einer schwarzen Farbe zu überziehen, damit eine Lichtspiegelung an diesen Flächen vermieden werde. Fällt nun auf dieses Prisma in der Richtung seiner Länge ein gewöhnlicher Lichtstrahl, so wird er in zwei geradlinig und senkrecht aufeinander polarisirte Strahlen zerlegt, die beide in der Ebene *abcg* oder in einer damit parallelen Ebene liegen. Nun steht der Brechungsexponent des Lichts bezüglich des Canadabalsams seiner Grösse nach (1,536) zwischen den Brechungsexponenten

Fig. 102.



(1,654 und 1,483) des ordentlichen und ausserordentlichen Strahles im Kalkspath. Darum kann der stärker abgelenkte ordentliche Strahl von der Balsamschicht, die auf ihn wie ein schwächer brechendes Mittel wirkt, total reflectirt werden, während der ausserordentliche Strahl, bezüglich dessen die Balsamschicht ein stärker brechendes Mittel ist, durch dieselbe in die zweite Hälfte des Prisma eindringt und aus dieser an der zur Eintrittsfläche des Lichtes parallelen Fläche hervortritt. Ein solches Prisma wirkt demnach ebenso wie ein parallel zur Axe geschliffenes Turmalinplättchen, insofern es nur die zum Hauptschnitte parallelen Schwingungen vollständig durchlässt; doch empfiehlt sich das erstere vor diesem wegen seiner Farblosigkeit. Dreht man ein Nicol'sches Prisma vor dem Auge in ähnlicher Weise wie ein Turmalinplättchen, so wird das Gesichtsfeld, wenn bereits polarisirtes Licht einfällt, abwechselnd hell und dunkel erscheinen, oder doch jedenfalls in verschiedener Lichtintensität, wenn das einfallende Licht nicht vollständig, sondern nur theilweise polarisirt sein sollte.

108. Fallen die beiden Bilder, die ein Kalkspathrhomboëder gibt, aufeinander, so entsteht aus den beiden zueinander senkrecht polarisirten Strahlen gewöhnliches (unpolarisirtes) Licht; daher man einen gewöhnlichen Lichtstrahl als die Resultirende zweier aufeinander senkrecht polarisirter Strahlen von gleicher Intensität betrachten kann. Setzt man also die Intensität des gewöhnlichen Lichtstrahles = 1, so zerfällt dieser im Kalkspath in zwei aufeinander senkrecht polarisirte Strahlen von der Intensität = $^1/_2$.

Nach den Principien der Undulationstheorie können zwei aufeinander senkrecht polarisirte Strahlen, welches auch ihr Gangunterschied sein möge, nicht so interferiren, dass sie sich gegenseitig vernichten (§. 92). Es entsteht vielmehr immer dieselbe Helligkeit, wenn sich das Licht des einen Strahles zu dem des anderen hinzugesellt, was Versuche von Arago und Fresnel vollständig bestätigt haben. Man bringe z. B. vor das Objectiv eines Fernrohres einen Schirm mit zwei gleichen parallelen Spalten und vor die letzteren zwei gleich dicke und auch sonst gleich beschaffene Turmalinplättchen. Sind nun die Polarisationsebenen des Lichtes in beiden Turmalinplättchen einander parallel, so sieht man eine bekannte Interferenzerscheinung, die aus dem Zusammentreffen der in einerlei Ebene polarisirten Strahlen hervorgeht. Dreht man aber das eine oder andere Plättchen so, dass die Po-

larisationsebenen beider aufeinander senkrecht zu stehen kommen, wo dann eben die durch die beiden Turmaline gehenden Strahlenbündel senkrecht auf einander polarisirt sind, so fallen die Interferenzstreifen weg, die bei der vorigen Stellung der Turmalinplättchen durch die gegenseitige Störung der von beiden Spalten herkommenden Lichtbündel bewirkt wurden. Diese Facta ergeben sich nun als nothwendige Folgen der Undulationstheorie, sobald man annimmt, dass die Schwingungen eines Lichtstrahles senkrecht (transversal) zu seiner Fortpflanzungsrichtung geschehen, wie denn überhaupt die Erscheinungen des polarisirten Lichtes nur in der Annahme transversaler Aetherschwingungen ihre Erklärung finden. Abgesehen von der Polarisation des Lichtes könnten allenfalls auch longitudinale Schwingungen dem Zwecke entsprechen; da sich jedoch auch die übrigen Lichterscheinungen auf transversale Aetherschwingungen zurückführen lassen, so ist dermalen kein Grund vorhanden, neben diesen noch die longitudinalen Schwingungen zur Erklärung der mannigfachen Lichtphänomene in Anspruch zu nehmen.

109. Dünne Plättchen doppelt brechender Krystalle zeigen unter Umständen im polarisirten Lichte schöne Farbenerscheinungen, die ihren Grund in der Interferenz der in einerlei Ebene polarisirten Strahlen haben. Fällt ein homogener geradlinig polarisirter Lichtstrahl auf ein solches Plättchen, so wird er in zwei zueinander senkrechte polarisirte Strahlen zerlegt, zwischen denen in Folge ihrer ungleichen Geschwindigkeit ein gewisser Gangunterschied besteht. Der eine dieser Strahlen, der ordentliche sei durch O, der andere, ausserordentliche durch E bezeichnet. Fallen nun diese Strahlen auf ein zweites Plättchen eines doppelt brechenden Krystalls, dessen Hauptschnitt eine bestimmte Stellung zum Hauptschnitte des ersten Plättchens hat; so werden die beiden Strahlen O und E wieder in zwei aufeinander senkrecht polarisirte Strahlen von gleicher Intensität zerlegt. Aus O resultirt ein ordentlicher Strahl o und ein ausserordentlicher e, ebenso aus E die beiden Strahlen o' und e'. Nun sind die Strahlen o und o', die aus dem zweiten Plättchen hervortreten, in derselben Ebene polarisirt, und die ausserordentlichen Strahlen e, e' gleichfalls in einer Ebene, die jedoch eine andere Lage als die vorerwähnte hat. Daher können sowohl die beiden Strahlen o und o' als auch die beiden Strahlen e und e' unter sich zur Interferenz gelangen,

d. h. sie können sich je nach ihrem Gangunterschiede gegenseitig verstärken oder vernichten. Nun rührt der ordentliche Strahl *o*, der aus dem zweiten Plättchen hervortritt, von dem ordentlichen Strahle *O* des ersten Plättchens her, der andere ordentliche Strahl *o'* des zweiten aber von dem ausserordentlichen *E* des ersten Plättchens. Darum besteht zwischen den Strahlen *o* und *o'* ein Gangunterschied, der bedingt ist durch die verschiedene Geschwindigkeit der Strahlen *O* und *E* im ersten Plättchen, also kurz durch den Gangunterschied dieser Strahlen, der wieder von der Dicke des erwähnten Plättchens abhängt. Derselbe Gangunterschied besteht aber auch zwischen den Strahlen *e* und *e'*. Sodann ist noch zu berücksichtigen, in welchem Sinne die Schwingungen der Strahlen *o*, *o'* und *e*, *e'* im Vergleich zu den Schwingungen des auf das erste Plättchen fallenden Strahles geschehen. Die weitere Entwickelung, zu deren Aufnahme hier nicht der Ort ist, zeigt, dass je nach der gegenseitigen Lage der Hauptschnitte beider Plättchen die Intensität der ordentlichen Strahlen *o*, *o'* am grössten sein muss, wenn die der ausserordentlichen am kleinsten ist, und so umgekehrt.

Nun ist bekanntlich die Wellenlänge für verschiedene homogene Farbestrahlen ungleich. Daher muss denn auch die Geschwindigkeitsdifferenz der beiden gebrochenen Strahlen *O* und *E* bei einem und demselben Plättchen für verschiedene Farbestrahlen eine ungleiche sein. Ist z. B. für rothes Licht der eine Strahl dem anderen um eine halbe Wellenlänge oder um ein bestimmtes Vielfache derselben vorausgeeilt, so wird dies beim violetten Lichte nicht ebenso stattfinden. Sollte nun, wenn der ursprüngliche polarisirte Strahl ein weisser ist, das gewöhnliche oder ungewöhnliche Bild der rothen Strahlen verschwinden, so werden nicht auch zugleich die gewöhnlichen oder ungewöhnlichen Bilder der übrigen Farbestrahlen wegfallen, sondern die letzteren werden noch bis zu einem gewissen Grade wirksam bleiben. Die Verschiedenheit aber, welche nach den obigen Bemerkungen zwischen den gewöhnlich und ungewöhnlich gebrochenen Strahlen besteht, bringt es mit sich, dass diejenigen Farbestrahlen, welche im gewöhnlichen Bilde zusammenwirken, im ungewöhnlichen sich aufheben müssen, und umgekehrt. Verschwinden z. B. in dem einen Bilde die violetten Strahlen, so werden sich dieselben im anderen unterstützen, was ebenso auch von den übrigen Farbestrahlen gilt. Wenn demnach

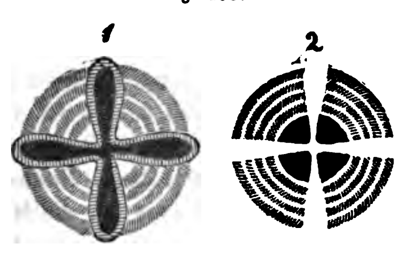


das ursprüngliche polarisirte Licht weiss ist, entstehen zwei Bilder mit complementären Farben, welche letztere von dem Gangunterschiede der zur Interferenz gelangenden Strahlen abhängen, der seinerseits wieder durch die Dicke des Plättchens bedingt ist; daher sich denn auch die Färbung mit der letzteren ändern muss.

Die Farbenerscheinungen im polarisirten Lichte kann man leicht darstellen, wenn man etwa von Seiten eines Polarisationsspiegels einen polarisirten Lichtstrahl auf ein dünnes Gyps- oder Glimmerplättchen fallen lässt und die aus dem letzteren hervortretenden Strahlen mittelst eines Nicol'schen Prisma in geeigneter Weise auffängt. Statt dieses Prisma kann man aber auch einen zweiten Glasspiegel oder eine Säule paralleler, dünner Glasplatten, also einen sog. Glassatz, anwenden, der das einfallende Licht in zwei aufeinander senkrecht polarisirte Componenten zerlegt. Die eine Componente ist in der Reflexionsebene, die andere senkrecht dazu polarisirt; die eine entspricht dem reflectirten, die andere dem durchgelassenen Lichte, und die Farbe des Plättchens erscheint in jenem complementär zu der im letzteren. Dreht man den Glassatz, ohne den Einfallswinkel des Lichtes zu ändern, um 90°, so geht die Farbe des Plättchens in die complementäre über. — Ueberschreitet die Dicke des Plättchens eine gewisse Grenze, so verschwindet die Farbenerscheinung.

110. Bringt man ein senkrecht zur Axe geschnittenes Plättchen eines doppelt brechenden Krystalls zwischen zwei polarisirende Vorrichtungen, so erblickt man unter gewissen Umständen eine Reihe concentrischer, gleichfarbiger (isochromatischer) Ringe, von denen eine gewisse Anzahl in der Ordnung der Newton'schen Farbenringe (§. 82) aufeinander folgt. Sehr einfach lässt sich diese brillante Farbenerscheinung zur Darstellung bringen, wenn man ein senkrecht zur optischen Axe geschnittenes Kalkspathplättchen zwischen zwei der Axe parallel geschliffene Turmalinplättchen bringt, die sich etwa in einer Röhre befinden, so dass das eine, welches man dicht vor das Auge hält, drehbar ist, während das andere gegen eine weisse Stelle des Himmels gehalten wird. Stehen die Polarisationsebenen, nämlich die Hauptschnitte beider Turmaline, aufeinander senkrecht, so erscheinen die Farbenringe von einem schwarzen Kreuze durchschnitten (Fig. 103. N. 1), das jedoch in ein weisses (N. 2) mit complementären Farbenringen

Fig. 103.



übergeht, wenn bei der Drehung des einen Turmalins beide Hauptschnitte untereinander parallel werden. Auch diese Farbenerscheinung erklärt sich aus der Interferenz polarisirter Lichtstrahlen. Gesetzt die Hauptschnitte beider Turmaline seien aufeinander senkrecht. Dann werden alle Strahlen, die von Seiten des nach Aussen gekehrten Turmalinplättchens rechtwinklig auf das Kalkspathplättchen fallen, durch dieses ungebrochen hindurchgehen, aber von dem zweiten vor dem Auge befindlichen Turmalinplättchen, zu dessen Axe die Schwingungen der Strahlen senkrecht geschehen, absorbirt werden, da dasselbe nur solche Schwingungen merklich durchlässt, die zu seiner Axe parallel sind. Auf diese Weise entsteht der vertikale Theil des schwarzen Kreuzes. Der horizontale Theil des letzteren kommt aber von Strahlen her, die im Kalkspathe nur die ungewöhnliche Brechung erfahren haben, deren Schwingungen also in seinem Hauptschnitte geschehen. Da indess auch diese Schwingungen senkrecht zur optischen Axe des zweiten Turmalinplättchens vor sich gehen, so werden sie gleichfalls von demselben absorbirt. Alle anderen Strahlen hingegen, die in schiefer Richtung auf den Kalkspath fallen, werden von ihm doppelt gebrochen. Diejenigen Strahlen nun, welche in der Mantelfläche eines Kegels liegen, deren Spitze im Auge und dessen Basis ein auf der Oberfläche des Kalkspathes vom Mittelpunkte des Kreuzes aus beschriebener Kreis ist, sind unter gleichem Winkel auf das Plättchen gefallen. An allen Punkten, die in der Peripherie dieses Kreises liegen, tritt aus dem Kalkspathplättchen ein ordentlicher und ausserordentlicher Strahl hervor, von denen der eine dem anderen um eine bestimmte Länge, die von der Dicke des Plättchens abhängt, vorauseilt. Aehnliche Verhältnisse gelten für andere mit dem vorigen concentrische Kreise. Je grösser aber der Halbmesser eines solchen Kreises ist, desto schiefer fallen die Strahlen, die durch den Umring desselben gehen,



auf das Plättchen, und um so grösser wird auch der Gangunterschied zwischen dem ordentlichen und ausserordentlichen Strahle sein. Erscheint nun irgend eine Stelle im Umringe eines solchen Kreises dunkel, so wird auch der ganze Umring dunkel erscheinen, da alle Strahlen, die von ihm durch das zweite Turmalinplättchen zum Auge gelangen, den Kalkspathkrystall in gleicher Neigung gegen die optische Axe durchlaufen haben. Hiernach erkennt man leicht, dass man im homogenen Lichte um die Mitte des Kreuzes vermittelst des zweiten Turmalinplättchens eine Reihe heller und dunkler Kreise sehen muss, sofern in gewissen Abständen von der Mitte der Gangunterschied zwischen den aus dem Kalkspath kommenden Strahlen bald eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfache derselben, bald eine ganze oder ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge betragen wird. Im weissen Lichte müssen aber farbige Kreise entstehen, in ganz ähnlicher Weise wie die Farbenringe Newton's hervortreten. Sind die Polarisationsebenen beider Turmaline zu einander parallel, so bemerkt man die complementäre Erscheinung.

Ausser dem Kalkspathe zeigen auch noch andere Krystalle des einaxigen Systems dieselben Farbenringe. Die letzteren erhalten jedoch eine ovale Form, wenn die Plättchen nicht genau senkrecht zur Axe geschliffen sind. Auch eine Unregelmässigkeit in der krystallinischen Structur der Plättchen giebt sich durch eine Verzerrung der Ringe zu erkennen. Andere Ringe als die einaxigen Krystalle zeigen dagegen Plättchen zweiaxiger Krystalle, wenn diese zu einer ihrer optischen Axen oder zur Halbirungslinie beider Axen senkrecht geschnitten sind.

111. Wie nun ein isotroper Körper, der in seinen sämmtlichen Punkten nach allen Richtungen optisch homogen ist, durch Druck und ungleiche Erwärmung die Eigenschaft gewinnt, das Licht doppelt zu brechen (§. 106), so erlangt er damit auch die Fähigkeit, im polarisirten Lichte Farbenerscheinungen darzubieten. Man kann dies beobachten an geglühten und schnell abgekühlten Glasplatten oder ebenso behandelten Glaswürfeln. Geschieht die Abkühlung langsam oder wird plötzlich abgekühltes Glas wieder erwärmt und dann langsam abgekühlt, so ist von der erwähnten Eigenschaft nichts zu bemerken. Es kommt also darauf an, dass im Glase, in Folge ungleicher Erwärmung, nach gewissen Rich-

tungen hin eine ungleiche Spannung seiner Theilchen herbeigeführt wird. Diese Bedingung wird auch erfüllt, wenn man einen Glaswürfel mittelst einer Presse zusammendrückt; er zeigt dann im Polarisationsapparate nach der Richtung des Druckes eine Farbenerscheinung. So können auch Glasstreifen, deren Theilchen durch Biegen nach einer gewissen Seite hin in grössere Spannung versetzt sind, das Licht doppelt brechen und im Polarisationsapparate farbige Streifen zeigen.

112. Die Farbenerscheinungen, welche aus der Interferenz polarisirter Lichtstrahlen resultiren, benutzt man nun sehr häufig als Erkennungsmittel solcher Strahlen. Befestigt man z. B. ein parallel mit seiner optischen Axe geschliffenes Turmalinplättchen vor einem senkrecht zur Axe geschnittenen Kalkspathplättchen und sieht dann durch das erstere nach einem Gegenstande hin, so sind die vom letzteren kommenden Lichtstrahlen polarisirt, wenn man Farbenringe wahrnimmt, sonst nicht. Man hat noch verschiedene andere Vorrichtungen dieser Art, die man alle Polariskope nennt, zu denen übrigens auch schon ein einfaches zur Axe parallel geschliffenes Turmalinplättchen (§. 100), sowie besonders auch das Nicol'sche Prisma (§. 107) gezählt werden kann. Auf die Farbenerscheinungen im polarisirten stützen sich ausser den bereits oben erwähnten noch die Polariskope von Savart*) und Haidinger.**) Die von Haidinger angegebene sehr zweckmässige Vorrichtung heisst „dichroskopische Loupe." Dieselbe besteht aus einem 1 bis $1^1/_2$ Zoll langen natürlichen Kalkspathrhomboëder, an dessen beiden Endflächen Glasprismen dergestalt angekittet sind, dass die äusseren Flächen, auf welche das Licht auffällt und wieder austritt, auf den Längskanten des Kalkspathes senkrecht stehen. Diese Combination steckt in einem Korkringe, der von einer Messinghülse umschlossen ist. Das eine Ende der letzteren ist durch eine Kapsel verschlossen, welche in ihrer Mitte eine quadratische Oeffnung von 2 bis 3 Millimeter Weite hat, während die Kapsel des anderen Endes in der Mitte mit einem runden Loche versehen ist. Zwischen diesem und dem Glasprisma liegt nun eine Linse von solcher Sehweite, dass man durch die Glasprismen und den Kalkspath hindurch die quadratische Oeffnung in zwei scharf be-

*) Poggend. Ann. Bd. XLIX. S. 292.
**) Poggend. Ann. Bd. LXIII. S. 29.

gränzten, sich fast berührenden Bildern erblickt. Da die Kapsel mit der quadratischen Oeffnung drehbar ist, so kann man sie so stellen, dass die beiden Bilder sich mit einer Seite berühren. Die Farben des ordentlichen und ausserordentlichen Bildes lassen sich hier, weil sie dicht beieinander liegen, sehr gut miteinander vergleichen. Die Strahlen beider Bilder sind aufeinander senkrecht polarisirt, und zwar die des einen im Sinne der Längenrichtung des Doppelbildes. Fallen nun geradlinig polarisirte Strahlen ein, so verschwindet das eine Bild bei einer gewissen Drehung des Kalkspathes ganz, während das andere in seiner grössten Helligkeit erscheint. Ist dagegen das einfallende Licht natürliches, so behalten beide Bilder während der Drehung ihre gleiche Helligkeit. Bei theilweise polarisirtem Lichte sieht man ebenfalls, wie man auch drehen mag, zwei Bilder, jedoch von wechselnder Intensität. — Ein zweckmässiges Polariskop ist auch das von Senarmont.*)

113. Ausser dem geradlinig polarisirten Lichte haben wir von Seiten der Theorie noch das kreisförmig und elliptisch polarisirte Licht kennen gelernt (S. 159 ff.). Das kreisförmig (circular) polarisirte Licht lässt sich unter anderem auf folgende Weise zur Darstellung bringen. Arago beobachtete zuerst an einem senkrecht zur Axe geschnittenen Quarzplättchen (Bergkrystall), dass dasselbe im geradlinig polarisirten Lichte ganz andere Erscheinungen darbietet, als die sonstigen einaxigen Krystalle. Fällt nämlich ein geradlinig polarisirter Lichtstrahl auf ein solches Plättchen, so tritt aus diesem ein Strahl hervor, der zwar gleichfalls geradlinig polarisirt ist, dessen Polarisationsebene aber um einen gewissen Winkel von der Polarisationsebene des ursprünglichen (einfallenden) Strahles abgelenkt ist. Man sagt dann, die Polarisationsebene dieses Strahles sei um den gegebenen Ablenkungswinkel gedreht worden. Verschiedene (senkrecht zur Axe geschnittene) Quarzplättchen drehen bei gleicher Dicke die Polarisationsebene in entgegengesetztem Sinne, so dass man rechts und links drehende Quarzplättchen unterscheidet. Die Richtung der Drehung ergiebt sich bei einer gewissen Quarzvarietät aus dem Vorkommen und der Anordnung unsymmetrischer trapezförmiger Flächen um den Scheitel der doppeltsechsseitigen Pyramide (des Krystalls), die um die

*) Annal. de Chim. et Phys. T. XXVIII. p. 279. — Poggend. Ann. Bd. LXXX. S. 293.

Axe der letzteren entweder eine rechts oder links gewundene Schraubenlinie bilden.*)

Man bringe nun ein senkrecht zur Axe geschnittenes Quarzplättchen von etwa 1 Millimeter Dicke zwischen zwei Polarisationsspiegel (§. 95), so dass ein von dem unteren Spiegel geradlinig polarisirter Lichtstrahl dasselbe in der Richtung seiner Axe treffe, und betrachte den oberen Spiegel durch ein homogen gefärbtes, etwa rothes Glas, das nur die rothen Strahlen in auffälliger Weise hindurchlässt. Dreht man nun den oberen Spiegel, dessen Ebene zunächst parallel zu dem unteren ist, so ergibt sich, dass das meiste rothe Licht bei einer Drehung um 19° reflectirt wird, während, wenn das Plättchen nicht eingeschaltet, das Maximum des vom oberen Spiegel reflectirten Lichtes gerade bei 0°, d. h. beim Parallelismus beider Spiegelflächen eintreten würde. Dreht man den oberen Spiegel weiter um, so folgt ein zweites Maximum reflectirten Lichtes bei 199° und nicht wie sonst bei 180° (vrgl. §. 95). Dagegen wird gar kein Licht reflectirt bei 109° und 289°, was ohne das Plättchen bei 90° und 270° geschehen würde. Man erkennt also, dass die Polarisationsebene des vom unteren Spiegel kommenden Lichtes durch das Quarzplättchen um einen Winkel von 19° (= 199—180, 109—90, 289—270) gedreht worden ist, und zwar nach der Rechten, falls das Plättchen ein rechtsdrehendes war. Bei einem linksdrehenden muss man den oberen Spiegel des Polarisationsapparates gegen die Linke drehen, um die beschriebene Erscheinung unter sonst gleichen Umständen zu beobachten.

Indessen ist die bezeichnete Drehung der Polarisationsebene für verschiedene homogene Farbestrahlen von ungleicher Grösse. So wird für violettes Licht die Polarisationsebene des ursprünglichen Strahles um 41° gedreht. Und daher erscheint denn auch bei Anwendung von weissem Lichte, als einem Gemisch aller homogenen Farbestrahlen, ein eigenthümlicher Farbenwechsel. —

*) Vgl. Herschel: Transact. of the Cambridge Society. T. I. pg. 43. — Poggend. Ann. Bd. XXI. S. 288. — Vgl. auch wegen einiger anderer Beziehungen der Krystallform mit den optischen Eigenschaften: Brewster in Edinb. Transact. T IX. pg. 139; Dove: Poggend. Ann. Bd. XL. S. 607; Pasteur: Annal. de Chim. et Phys. T. XXIV., Compt. rend. T. XXVIII. No. 15., T. XXXI. pg. 480; Poggend. Ann. Bd. LXXX. S. 127, Bd. LXXXII. S. 144.

Endlich ist die Grösse der Drehung auch von der Dicke des Krystallplättchens abhängig, der Art, dass sie derselben proportional ist.

114. Die besprochene Drehung der Polarisationsebene findet nach der Undulationstheorie ihre Erklärung darin, dass der geradlinig polarisirte Lichtstrahl, welcher auf das Quarzplättchen fällt, in diesem zwei Lichtstrahlen erregt, die in entgegengesetztem Sinne circular polarisirt sind, und sich in der Richtung der Axe des Krystalls fortpflanzen. Geschehen also die Schwingungen des einen Strahles in kreisförmigen Bahnen von der Rechten gegen die Linke, so werden die Schwingungen des anderen in entgegengesetzter Richtung, von der Linken gegen die Rechte, vollführt. Bewegen sich nun diese beiden Strahlen längs der Axe eines Quarzplättchens mit ungleicher Geschwindigkeit durch dasselbe, so werden sie sich bei ihrem Austritt aus dem Krystall zwar wieder zu einem geradlinig polarisirten Strahle zusammensetzen, aber die Richtung des letzteren wird von der des einfallenden Strahles verschieden sein, womit denn eben die oben charakterisirte Drehung der Polarisationsebene in nächster Beziehung steht. Die Schwingungsrichtung des geradlinig polarisirten Strahles, der aus dem Zusammenwirken der beiden aus dem Plättchen hervortretenden circular polarisirten Strahlen entsteht, ist durch die Anzahl der Wellenlängen bedingt, um welche der eine dieser Strahlen dem anderen vorauseilt, also kurz durch ihren Gangunterschied, der wieder von der Dicke des Plättchens abhängt. Die Polarisationsebene des einfallenden geradlinig polarisirten Strahles wird aber nach rechts oder links gedreht, je nachdem der rechts oder links circular polarisirte Strahl sich mit grösserer Geschwindigkeit durch den Krystall bewegt; hiervon muss die Richtung der geradlinigen Oscillation abhängen, die ein Aetherttheilchen annimmt, das unter dem Einfluss der beiden circular polarisirten Strahlen steht, wenn diese aus dem Krystall in die Luft übergehen. Wäre die Dicke des Plättchens gerade so gross, dass zwischen beiden circular polarisirten Strahlen keine Geschwindigkeitsdifferenz stattfände, so würden sich dieselben zu einem geradlinig polarisirten Strahle zusammensetzen, dessen Polarisationsebene mit der des ursprünglichen Strahles zusammenfiele. — Da nun bei einem und demselben Quarzplättchen der Gangunterschied der beiden circular polarisirten Strahlen für die verschiedenen homogenen Farbestrahlen un-

gleich ist, so erklärt sich daraus der Farbenwechsel, welcher eintritt, wenn das einfallende Licht weiss ist.

115. Es kommt noch darauf an, die beiden circular polarisirten Strahlen, die sich in einem senkrecht zur Axe geschnittenen Quarzplättchen längs der letzteren fortpflanzen, auf das Princip zurückzuführen, das wir im §. 92 erläutert haben. Wir erkannten dort, dass aus dem Zusammenwirken zweier geradliniger und aufeinander senkrechter Schwingungen eine circulare Schwingung resultiren müsse, wenn zwischen ihnen ein Phasenunterschied von $^1/_4$ Schwingungsdauer besteht. Nun kann man sich nach den theoretischen Entwickelungen von Fresnel*) jeden geradlinig polarisirten Lichtstrahl in zwei andere zerlegt denken, die dieselbe Polarisationsebene haben und also ihre Schwingungen in derselben Ebene vollziehen, deren Intensitäten aber halb so gross als die Intensität des ursprünglichen Strahles sind, während zwischen beiden ein Gangunterschied in der Art besteht, dass der eine Strahl dem ursprünglichen um $^1/_8$ Wellenlänge vorauseilt und der andere um eben so viel gegen denselben zurückbleibt. Und zweitens ist es erlaubt, sich jeden geradlinig polarisirten Lichtstrahl in zwei andere Strahlen von gleicher Intensität zerlegt zu denken, deren Polarisationsebenen mit der Polarisationsebene des ursprünglichen Strahles, zur Rechten und Linken derselben, Winkel von $+ 45^0$ und $- 45^0$ bilden.

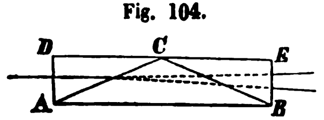
Man denke sich nun, dass der ursprüngliche geradlinig polarisirte Lichtstrahl P bei seinem Eindringen in das Quarzplättchen in zwei andere Strahlen P' und P'' zerlegt werde, deren Polarisationsebenen Winkel von $+ 45^0$ und $- 45^0$ mit der ursprünglichen Polarisationsebene einschliessen, und wende auf beide Strahlen den ersten der kurz zuvor ausgesprochenen Sätze an. Der Strahl P' lässt sich dann als die Relsultante aus zwei Strahlen p' und p'' betrachten, die beide in derselben Ebene $(+ 45^0)$ polarisirt sind, und zwischen denen ein Gangunterschied von $^1/_4$ Wellenlänge oder eine Phasendifferenz von $^1/_4$ Schwingungsdauer besteht. In gleicher Weise kann man den Strahl p'' als die Resultante zweier Strahlen p_1 und p_2 auffassen, die beide in einer Ebene $(- 45^0)$ polarisirt sind und einen Gangunterschied von $^1/_4$ Wellenlänge darbieten. Nun haben wir vier Wellensysteme p', p'', p_1, p_2 von gleicher Intensität, von denen je zwei geradlinig und senkrecht auf-

*) Annal. de Chim. et Phys. T. XXVIII. p. 147; T. XXIX. p. 175.

einander polarisirt sind. So sind p' und p_2 zwei geradlinig und aufeinander senkrecht polarisirte Strahlen, zwischen deren Schwingungen eine Phasendifferenz von $^1/_4$ Schwingungsdauer besteht. Beide Strahlen werden zusammen einen circular polarisirten Strahl geben, da (nach §. 92) aus dem Zusammentreffen zweier aufeinander senkrechter Schwingungen bei der angegebenen Phasendifferenz eine kreisförmige Schwingung resultirt. Dasselbe gilt für die geradlinig und senkrecht aufeinander polarisirten Strahlen $p'' p_1$, nur mit dem Unterschiede, dass die drehenden Schwingungen des aus ihnen resultirenden Strahles im entgegengesetzten Sinne wie beim vorerwähnten geschehen, nämlich von der Rechten gegen die Linke, während sie dort von der Linken gegen die Rechte vollzogen werden. So haben wir also zwei entgegensetzt circular polarisirte Strahlen, die sich im Quarzplättchen längs seiner Axe fortpflanzen und bei ihrem Uebergange in die Luft zu einem geradlinig polarisirten Strahle vereinigen, dessen Polarisationsebene je nach der Geschwindigkeitsdifferenz beider Strahlen nach der Rechten oder Linken von der Polarisationsebene des ursprünglichen Strahles abgelenkt sein wird.

116. Nun hat Fresnel in der That mittelst einer Vorrichtung, die aus rechts und links drehenden Quarzprismen zusammengesetzt war, dargethan, dass sich im Bergkrystall längs seiner Axe zwei Strahlen von besonderer Art fortpflanzen. In nebenstehender Figur sieht man den Durchschnitt dreier Prismen aus Bergkrystall,

Fig. 104.



die an den Flächen AC und BC sorgfältig mit einander verbunden sind. Das mittlere ACB dreht die Polarisationsebene des Lichtes gegen die Linke und hat einen sehr stumpfen brechenden Winkel $C = 152°$; seine optische Axe ist parallel zur gegenüberliegenden Fläche AB. Die beiden anderen rechtwinkligen Quarzprismen drehen die Polarisationsebene gegen die Rechte und ihre Flächen AD und BE stehen senkrecht gegen die optische Axe. So hat also in dem ganzen System dieser drei Prismen, nämlich im Parallelopiped $ABED$, die optische Axe eine und dieselbe, zu AB parallele, Richtung. Dringt nun in dieses Parallelopiped, senkrecht gegen die Fläche AD, ein geradlinig polarisirter Lichtstrahl ein, so sollte derselbe nach den bekannten Gesetzen der gewöhnlichen doppelten Strahlenbrechung ohne Theilung in zwei neue

Strahlen nach der Richtung der optischen Axe hindurchgehen, da ja im Sinne der letzteren keine doppelte Brechung stattfindet. Der Versuch zeigte jedoch ein anderes Verhalten. An der gegenüberstehenden Fläche *BE* treten zwei divergirende Strahlen hervor, die keine Eigenschaft des geradlinig polarisirten Lichtes verrathen. Der Erfolg dieses Versuches entspricht nun ganz der theoretischen Erwartung. Der einfallende geradlinig polarisirte Strahl zerlegt sich an der Fläche *AD* in zwei, nach entgegengesetzten Richtungen polarisirte Strahlen, die das Prisma *ACD* in derselben Richtung, nämlich längs der Axe, aber mit verschiedener Geschwindigkeit durchlaufen. Daher erfahren diese Strahlen an der schiefen Fläche *AC* eine verschiedene Brechung; der Strahl, dessen Geschwindigkeit kleiner, wird stärker gebrochen als der andere. Da aber das Prisma *ACB*, im Vergleiche zum ersten Prisma *ACD*, die Polarisationsebene des Lichts im entgegengesetzten Sinne dreht, so muss derjenige Strahl, welcher sich im ersten Prisma schneller forbewegte, im zweiten der langsamere sein, und umgekehrt. Hierdurch wird nun eben eine merkliche Trennung der beiden gebrochenen Strahlen bewirkt, die sich im dritten Prisma, das bezüglich des zweiten *ACB* entgegengesetzt dreht, noch weiter voneinander entfernen, indem sie an der Fläche *BC* wieder gebrochen und einen abermaligen Umtausch ihrer Geschwindigkeiten erfahren. So treten an der Fläche *BE* zwei divergirende Strahlen hervor, die eben die beiden kreisförmig polarisirten Strahlen sind, welche in Folge der eigenthümlichen Anordnung der Massentheilchen im Bergkrystall längs der Axe desselben sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen.

117. Endlich hat Fresnel, gestützt auf die Principien der Undulationstheorie, noch ein Glasparallelopiped construirt, vermittelst dessen sich wirklich darthun lässt, dass zwei geradlinig und senkrecht aufeinander polarisirte Strahlen von gleicher Intensität einen neuen Lichtstrahl liefern, der in seiner Erscheinung alle Eigenschaften zeigt, die man an einem sog. circular polarisirten Strahle wahrnimmt. In nebenstehender Figur ist *mnpq* der Durchschnitt eines Parallelopipeds aus Crownglas mit dem Brechungsexponenten 1,5. Die spitzen Winkel *m* und *q* betragen etwa 54°, mithin die beiden stumpfen 126°. Ein gradlinig pola-

Fig. 105.

risirter Lichtstrahl *ab*, der senkrecht gegen die Fläche *mn* des Parallelopipeds fällt, tritt nun aus demselben nach zwei inneren totalen Reflexionen (bei *t* und *t'*) senkrecht gegen die Ebene *pq* im Zustande circularer Polarisation hervor, wenn das Parallelopiped so gestellt ist, dass die Ebene der inneren Reflexion einen Winkel von 45° mit der ursprünglichen Polarisationsebene macht. Der Strahl *ab* wird nämlich in zwei geradlinige und aufeinander senkrechte Componenten zerlegt, so dass die Schwingungen der einen in der Reflexionsebene des Strahles, die der anderen senkrecht dazu geschehen. Zwischen diesen beiden Componenten wird aber durch die zweimalige totale Reflexion ein gewisser Gang- oder Phasenunterschied herbeigeführt, der sich durch Rechnung bestimmen lässt. Derselbe beträgt bei dem erwähnten Glase für jede innere Reflexion $^1/_8$ einer ganzen Schwingung oder $^1/_8$ Wellenlänge, also für beide Reflexionen $^1/_4$ Wellenlänge. Beide Componenten müssen daher nach der Theorie (§. 92) einen kreisförmig polarisirten Strahl *ce* geben, der nun in der That sich wesentlich von einem geradlinig polarisirten Strahle unterscheidet, wie man z. B. findet, wenn man ihn mit einem Doppelspathprisma untersucht. Fängt man ihn mittelst des letzteren auf, während das obige Parallelopiped um eine Axe gedreht wird, die auf der Eintrittsfläche des Lichtes senkrecht ist, so verändert sich zwar die Lichtintensität des einen oder anderen Bildes, welche das Prisma gibt, aber keines dieser Bilder kommt zum völligen Verschwinden, wie es bei geradlinig polarisirtem Lichte geschehen würde. Der Strahl *ce* verhält sich ganz so wie einer von jenen Strahlen, die durch ein System von Quarzprismen in der angegebenen Weise erhalten werden. Bildet die Reflexionsebene des Parallelopipeds, wie wir annahmen, einen Winkel von 45° mit der Polarisationsebene des Strahles *ab* (Fig. 105), so bemerkt man gar keine Aenderung in der Intensität der beiden Bilder des Doppelspathprisma, wenn man dem letzteren verschiedene Stellungen gibt.

Lässt man bei der bezeichneten Stellung des Parallelopipeds den aus ihm hervortretenden Strahl *ce* in ein zweites Parallelopiped von derselben Beschaffenheit eindringen (Fig. 106), so kann man sich denselben hier in seine beiden geradlinigen und aufeinander senkrechten Componenten zerlegt denken, zwischen denen nach dem Obigen ein Phasenunterschied von $^1/_4$ Schwingungsdauer besteht. Da nun auch im zweiten Parallelopiped zwei totale Re-

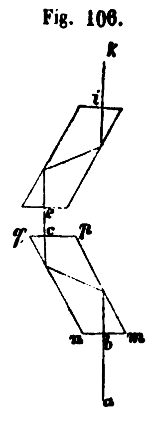


Fig. 106.

flexionen stattfinden, die zusammen einen Phasenunterschied von $^1/_4$ Schwingungsdauer begründen, so beträgt jetzt der gesammte Phasenunterschied der beiden Componenten $^1/_2$ Schwingungsdauer. Nun resultirt aber aus dem Zusammentreffen zweier geradlinig und senkrecht aufeinander polarisirten Wellensysteme, zwischen deren Schwingungen ein Phasenunterschied von $^1/_2$ Oscillationsdauer existirt, wiederum ein geradlinig polarisirtes Wellensystem (s. §. 93). So tritt aus dem zweiten Parallelopiped ein geradlinig polarisirter Strahl *ik* hervor, dessen Polarisationsebene jedoch gegen die Reflexionsebene dieses Parallelopipeds um einen Winkel von 45° geneigt ist. Ein derartiges Verhalten zeigt ein gewöhnlicher (unpolarisirter) Strahl nicht, und so unterscheidet sich das circular polarisirte Licht auch von dem gewöhnlichen oder sog. natürlichen Lichte. Indessen bieten auch die Farbenerscheinungen, die das circular polarisirte Licht bei seinem Durchgange durch gewisse Krystallplättchen zeigt, eigenthümliche Merkmale dar, die dasselbe von dem natürlichem Lichte unterscheiden.

Im §. 110 haben wir die Farbenringe hervorgehoben, die ein senkrecht zur Axe geschnittenes Doppelspathplättchen zwischen zwei Turmalinplättchen im geradlinig polarisirten Lichte zeigt. Bringt man nun an die Stelle des Doppelspathes ein senkrecht zur Axe geschnittenes Quarzplättchen, so sieht man zwar noch die farbigen Kreise, aber von dem schwarzen Kreuze sind nur noch Spuren am Umfange der Figur zu erkennen. Auch hierdurch unterscheidet sich das circular polarisirte Licht von dem geradlinig polarisirten.

118. Wenn die Polarisationsebene des geradlinig polarisirten Strahles *ab* (Fig. 105) mit der inneren Reflexionsebene des Parallelopipeds *mnpq* einen anderen Winkel als 45° macht, so zerfällt dieser Strahl zwar wieder in zwei geradlinige und aufeinander senkrechte Componenten, zwischen denen auch in Folge der zweimaligen totalen Reflexion ein Phasenunterschied von $\frac{1}{4}$ Schwingungsdauer besteht, allein die Intensitäten beider Componenten sind ungleich. In diesem Falle tritt aus dem Glasparallelopiped ein e l l i p t i s c h p o l a r i s i r t e r Lichtstrahl (§. 92 u. 93) hervor, der zwar auch bei seinem Durchgange durch ein zweites Parallel-

epiped wieder geradlinig polarisirt wird, aber so, dass seine Polarisationsebene mit der Reflexionsebene dieses Parallelepipedums einen kleineren Winkel als 45° macht. Sehr häufig wird die elliptische Polarisation durch Reflexion des Lichtes an metallischen Oberflächen herbeigeführt. Fällt z. B. ein geradlinig polarisirter Lichtstrahl auf eine Metallfläche dergestalt, dass seine Polarisationsebene gegen die Einfalls- oder Reflexionsebene unter einem Winkel von 45° geneigt ist, so erscheint der reflectirte Strahl elliptisch polarisirt. Der auffallende Strahl wird nämlich durch die Reflexion auch hier in zwei geradlinig und senkrecht aufeinander polarisirte Strahlen zerlegt, so dass die Schwingungen des einen in der Reflexionsebene, die des anderen dagegen senkrecht darauf geschehen. Zwischen den Schwingungen dieser beiden Strahlen besteht aber ein Phasenunterschied, der verschieden ist von jenem, welcher die circulare Polarisation bedingt. Nun kann der so durch Reflexion elliptisch polarisirte Strahl dadurch, dass er von einer zweiten zur ersten parallelen Metallfläche reflectirt wird, in den Zustand geradliniger Polarisation zurückgeführt werden, allein die Polarisationsebene des neuen Strahles ist um weniger als 45° gegen die ursprüngliche Polarisationsebene geneigt. Hiermit ist ein Unterschied zwischen einem circular und elliptisch polarisirten Strahle gegeben. Es falle z. B. ein geradlinig polarisirter Lichtstrahl auf eine polirte Stahlplatte unter einem Winkel von 75° in einer Ebene, die um 45° gegen die Polarisationsebene geneigt ist. Der reflectirte Strahl ist dann elliptisch polarisirt. Wird derselbe von Neuem an einer zweiten Stahlplatte unter 75°, bei einem Winkel von 45° zwischen der Reflexionsebene und der ursprünglichen Polarisationsebene, reflectirt, so erscheint er wieder geradlinig polarisirt, aber dergestalt, dass die neue Polarisationsebene mit der ursprünglichen einen Winkel von 17° macht.*)

119. In gleicher Art und Weise wie der Bergkrystall zeigen noch verschiedene andere Körper, namentlich auch tropfbare Flüssigkeiten und selbst Gase, eine circulare Polarisation des Lichtes. So ist es z. B. bekannt, dass durch Terpentinöl und dessen

*) Bezüglich der elliptischen Polarisation ist zu vergleichen: Poggend. Ann. Bd. XXVI. S. 89, Bd. XXXIX. S. 40, Bd. LXXIV. S. 248, Bd. LXXXII. S. 149, Ergänzungsband III. S. 232, 269, 546. — Annal. de Chim. et Phys. sér. III. T. XXIX. u. XXXI. — Philos. Magaz. Ser. IV. T. VIII. p. 507.

Dämpfe, durch Kirschlorbeerwasser, so wie durch Lösungen von arabischem Gummi und Traubenzucker, so lange dieser noch nicht fest gewesen ist, die Polarisationsebene eines einfallenden geradlinig polarisirten Lichtstrahles von der Rechten gegen die Linke, dagegen durch Dextrin und Kampherlösungen in Weingeist, wie auch durch Weinsteinsäurelösungen und Lösungen von Rohr- und Runkelrübenzucker gegen die Rechte gedreht wird. Die Drehung ist bei Lösungen dem Concentrations- oder Sättigungsgrade proportional und bei gleicher Sättigung der Dicke der Flüssigkeitsschicht.

Aus der Thatsache, dass tropfbare Flüssigkeiten und Dämpfe (Gase) die circulare Polarisation bewirken, müssen wir schliessen, dass solche Flüssigkeiten ungeachtet ihrer scheinbaren Homogeneität doch nicht innerlich formlose Massen sind, sondern vielmehr, wie sich dies auch aus anderweitigen Gründen ableiten lässt, aus kleinsten Massentheilchen (Moleculen) bestehen, die aus ihren einfachen Grundatomen in gleicher oder ähnlicher Weise wie die Massentheilchen solcher starrer Körper constituirt sind, welche unter denselben Umständen gleiche oder ähnliche optische Eigenschaften darbieten. Nun hat sich sogar herausgestellt, dass sehr viele durchsichtige Medien, sowohl starre als auch tropfbare, die unter gewöhnlichen Umständen keine circulare Polarisation bewirken, diese Eigenschaft gewinnen, sobald sie auf geeignete Weise der Einwirkung des Magnetismus ausgesetzt werden. Die Ursache liegt höchst wahrscheinlich darin, dass die Molecule dieser Körper und die ihnen adhärirenden Aetherelemente vermöge der magnetischen Einwirkung nach einer gewissen Richtung hin eine andere Anordnung gewinnen, und zwar eine solche, wie sie in den gewöhnlichen der Circularpolarisation fähigen Substanzen von Natur vorhanden ist. Jedenfalls gerathen die um die Molecule gruppirten Aethertheilchen durch die magnetische Einwirkung in eine Stellung und Bewegung, welche das Hervortreten der circularen Polarisation bedingt.

120. Blicken wir nun noch einmal zurück auf die Principien der Undulationstheorie, so findet sich, dass die physikalische Ursache des Lichtes in Schwingungen eines elastischen Mediums, des sog. Aethers, besteht, und zwar in Schwingungen, die im Allgemeinen senkrecht sind auf der Fortpflanzungsrichtung der Strahlen. Allein ein homogener Lichtstrahl bietet verschiedene Eigen-

schaften dar, je nachdem die auf seiner Richtung senkrechten Aetherschwingungen alle zueinander parallel sind oder nicht. Im ersten Falle zeigt er nach verschiedenen Seiten hin verschiedene Eigenthümlichkeiten, weshalb man ihn einen polarisirten Strahl nennt. Nun können aber die unter sich parallelen Schwingungen in geradlinigen, kreisförmigen oder elliptischen Schwingungen geschehen, wonach man geradlinig, kreisförmig und elliptische polarisirte Strahlen unterscheidet, die sich in der Erscheinung durch besondere Merkmale kenntlich machen. Die elliptische Polarisation ist der allgemeinste Fall, der die beiden anderen Fälle der circularen und geradlinigen Polarisation in sich begreift; denn aus der elliptischen Bahn resultirt eine kreisförmige, wenn die beiden Axen der ersteren einander gleich werden, und eine geradlinige, falls die eine Axe verschwindet.

Die gewöhnlichen (unpolarisirten) Strahlen, die das sog. natürliche Licht ausmachen, sind im Allgemeinen durch den Nichtparallelismus ihrer Schwingungen charakterisirt, so dass die Schwingungen eines solchen Strahles während seiner Fortpflanzung nach allen möglichen Richtungen wechseln können, die auf der Fortpflanzungsrichtung desselben senkrecht stehen. Daher pflegt man wohl zu sagen, dass man das natürliche Licht als polarisirtes betrachten könne, dessen Polarisationsebene eine beständige Veränderung erfahre, der Art, dass solches Licht binnen einer gewissen Zeit nach allen möglichen Richtungen polarisirt sei. Dieser Annahme entspricht ein Versuch von Dove.*) Derselbe liess die Strahlen einer Lampe auf ein Nicol'sches Prisma, welches mit sehr grosser, aber gleichförmiger Geschwindigkeit rotirte, parallel der Drehungsaxe auffallen. Während der Drehung erhielten die Schwingungs- und Polarisationsebenen der durch das Prisma geradlinig polarisirten Strahlen alle möglichen Richtungen und das austretende Licht erwies sich als unpolarisirtes. Bestimmter können wir nun mit A. Beer**) das unpolarisirte Licht so definiren: „Dasselbe besteht aus Gruppen von vielen, untereinander gleichen und geradlinigen Oscillationen, so dass die Oscillationsrichtungen dieser Gruppen in sehr kleinen Zeiten alle möglichen Azimuthe durchlaufen. Dabei ist der Mittelwerth der Intensitäten aller Os-

*) Poggend. Ann. Bd. LXXI. S. 115.

**) Einleitung in die höhere Optik, 1853. S. 144 ff.

cillationen von einem Azimuthe zum anderen constant, wenn die Intensität des Lichtes es ist." Denkt man sich zwei solcher Strahlen unpolarisirten Lichtes zusammenwirkend, in der Art, dass ihre Strecken gleicher Oscillationen zusammenfallen, so wird aus ihnen wieder ein unpolarisirter Strahl resultiren, dessen Schwingungen aber im Allgemeinen elliptische sein werden, die sich von einer Strecke gleicher Oscillation zur anderen im Sinne der Drehung, in der Lage, dem Verhältnisse und der Grösse ihrer Axen ändern. Und hiernach wäre die allgemeinste Annahme bezüglich des natürlichen Lichtes die, dass man es ansieht als bestehend aus elliptischen Oscillationen in dem eben angegebenen Sinne.*) Die beschränktere Annahme geradliniger Oscillationen ist jedenfalls nicht nothwendig, um das Verhalten des sog. natürlichen Lichtes zu erklären.

Was endlich den Vorgang der Polarisation des Lichtes selbst betrifft, so besteht derselbe im Allgemeinen darin, dass natürliche Strahlen, wenn sie unter gewissen Umständen, die wir kennen gelernt haben, aus einem optischen Medium auf ein anderes fallen, im Acte der Reflexion und Brechung zu anderen Strahlen Anlass geben, in welchen die Schwingungen der Aethertheilchen auf eine und dieselbe Polarisationsebene zurückgeführt sind, so dass sie also alle in parallelen Richtungen geschehen. Dabei kommt es aber vor, dass die verschiedenen Wellensysteme, welche das reflectirte und gebrochene Licht bilden, zwar beide geradlinig, aber aufeinander senkrecht polarisirt werden, dergestalt, dass die Schwingungen des reflectirten und gebrochenen Wellensystems aufeinander senkrecht stehen, was ebenso auch für die beiden Wellensysteme gilt, die beim Auffallen natürlichen Lichtes auf einen doppelt brechenden Krystall entstehen. Die kreisförmige und elliptische Polarisation resultirt aber aus dem Zusammenwirken je zweier geradlinig und senkrecht auf einander polarisirter Strahlen, zwischen deren Schwingungen bei gleicher Intensität ein bestimmter Phasenunterschied besteht, und die elliptische Polarisation überdies auch dann, wenn den Intensitäten jener Strahlen bei einem bestimmten Phasenunterschiede ungleich sind.

121. Die Qualität eines homogenen Lichtstrahles ist durch die Schwingungsdauer der ihn constituirenden Aethertheilchen be-

*) Vgl. Beer a. a. O. S. 149.

dingt, wie auch die Schwingungsbahnen der letzteren, senkrecht auf der Fortpflanzungsrichtung des Strahles, beschaffen sein mögen. Die Schwingungsdauer oder, was damit unmittelbar zusammenhängt, die Anzahl der Oscillationen, welche die Aethertheilchen eines bestimmten Strahles innerhalb der Zeiteinheit vollenden, bestimmt die Farbenempfindung, die der Lichtstrahl, nämlich das ihn bewirkende Aetherwellensystem, in uns erregt. So wird eine einfache homogene Farbe durch Aetherwellen erzeugt, deren sämmtliche Aethertheilchen gewisse Schwingungen von einer bestimmten Dauer vollziehen, und die verschiedenen homogenen Spectralfarben, die ein Prisma aus dem Sonnenlichte sondert, unterscheiden sich physikalisch durch die ungleiche Schwingungsdauer der betreffenden Aetherwellensysteme, wie denn auch die ungleiche Brechbarkeit der verschiedenen Farbestrahlen mit der Schwingungsdauer in allernächster Beziehung steht.

Nun können wir das weisse Sonnenlicht zunächst als ein Gemisch der verschiedenen Aetherwellensysteme betrachten, welche das Prisma aus demselben auszusondern vermag. Und in dieser Beziehung lässt sich die Empfindung der weissen Farbe physikalisch dem Geräusche vergleichen, das aus einem Gemenge von Schallwellen besteht, deren Perioden nicht zu unterscheiden sind. Die Empfindung der weissen Farbe kann aber nicht allein durch eine Mischung aller homogenen Spectralfarben bewirkt werden, sondern auch durch die Mischung zweier einfacher Spectralfarben, deren es eine gewisse Anzahl complementärer Paare gibt. Physikalisch genommen ist also die weisse Farbe doch immer eine zusammengesetzte, eine Resultante aus Schwingungen von ungleicher Dauer.

122. Die sog. natürlichen Farben, welche die Körper gewöhnlich im Sonnenlichte zeigen, sind (§. 59 f.) auf den Umstand zurückgeführt, dass die Körper Strahlen von einem gewissen Grade der Brechbarkeit absorbiren, während sie andere zurückwerfen oder durchlassen. Dies ist also im Sinne der Undulationstheorie eine durch die Körper bewirkte Aussonderung gewisser Aetherwellen aus dem Wellencomplex des weissen Sonnenlichtes, und ein Pigment (Farbstoff) ist hiernach eine Substanz, die Aetherwellen von bestimmter Wellenlänge und Schwingungsdauer aussondert und verbreitet. Die absorbirten Strahlen sind aber solche Aetherwellen,

welche die Körper nicht zu reflectiren und auch nicht durchzulassen vermögen.

Die Absorption insbesondere lässt sich allenfalls als ein Interferenzphänomen betrachten. Um dies zu erläutern, erinnern wir an §. 45, worin bemerkt wurde, dass die Anzahl der dunklen Streifen im Sonnenspectrum zunimmt, wenn man das Sonnenlicht vor dem Auffallen auf das Prisma durch gewisse Dämpfe gehen lässt. Hier werden also bei dem Durchgange des weissen Lichtes durch eine Dampfschicht Aetherwellen von bestimmter Länge und somit auch die ihnen entsprechenden Farben ausgelöscht. Nun bestimmte H. Ermann die Wellenlängen der Strahlen, die sich im Spectrum nicht mehr vorfinden, wenn das weisse Licht durch Jod- oder Bromdämpfe gegangen ist, und kam zu der Ansicht, dass das Verschwinden dieser Strahlen die Folge einer Interferenz zweier Wellensysteme sei, von denen das eine direct durch die Dampfschicht hindurchgehe, während das andere eine zweimalige innere Reflexion an den Grenzen der Dampfschicht erfahre, wodurch zwischen beiden Systemen ein Gangunterschied herbeigeführt werde, der ihre Vernichtung in bekannter Weise bedinge. Eine solche Interferenz lässt sich auch wirklich mittelst dünner Glimmerplättchen hervorbringen, wo dann die hervorgehenden Erscheinungen ganz analog jenen sind, die man an einem durch eine Dampf- oder Gasschicht erzeugten Spectrum beobachtet. Wrede, der schon längst die Lichtabsorption als ein Interferenzphänomen darzuthun suchte*), bog ein dünnes Glimmerplättchen zu einem Cylinder um und liess auf den letzteren Kerzenlicht oder die von einem Metallspiegel reflectirten Sonnenstrahlen fallen. Der Cylinder reflectirte nun das einfallende Licht theils von seiner Vorder- und theils von seiner Hinterfläche, so dass zwischen den so reflectirten Strahlen ein von der Dicke des Glimmerplättchens abhängiger Gangunterschied bestand. Ist das Plättchen sehr dünn, so erscheint das von ihm reflectirte Licht farbig, bei grösserer Dicke dagegen weiss. Wenn man nun im letzteren Falle mittelst der feinen Lichtlinie, welche das an der Vorder- und Hinterfläche reflectirte Licht bildet, ein Spectrum erzeugt, so sieht man es mit schwarzen Linien durchzogen, deren Anzahl mit der Dicke des Plättchens grösser wird. Aehnliche Versuche stellte H. Ermann an, indem

*) Poggend. Ann. Bd. XXXIII. S. 353.



er auf sehr dünne Glimmerplättchen von verschiedener Dicke Tageslicht durch eine enge Spalte senkrecht fallen liess und aus dem hindurchgegangenen Lichte ein prismatisches Spectrum erzeugte. Auch hier zeigten sich regelmässig gestellte dunkle Linien, die aus dem Wegfallen gewisser Strahlen entstanden, und zwar durch Interferenz zweier Wellensysteme, von denen das eine direct durch das Glimmerplättchen hindurchging, während das andere aus zwei Reflexionen, an der Vorder- und Hinterfläche des Plättchens, resultirte.

123. Es liegt nun nahe, diese Ansicht zu generalisiren und die Absorption des Lichtes überhaupt als ein Interferenzphänomen aufzufassen, also auch da, wo die vom weissen Tageslichte beleuchteten Körper uns in Folge der Unterdrückung gewisser Aetherwellen in bestimmten Farben erscheinen. Dringt nämlich das Licht in einen Körper ein, so können die einfallenden Aetherwellen im Innern des Körpers an seinen Massentheilchen eine wiederholte innere Reflexion erfahren, wodurch viele neue Wellensysteme entstehen, die mit den nachfolgenden Wellen zur Interferenz gelangen, also dieselben je nach dem Gangunterschiede verstärken oder schwächen werden. Und so ist es sehr wohl denkbar, dass in dieser Weise Aetherwellen von bestimmter Länge ganz vernichtet werden, wo dann natürlich auch die ihnen entsprechende Farbe nicht hervortreten kann. Weil nun den verschiedenen homogenen Farben Aetherwellen von ungleicher Länge zu Grunde liegen, wird es von der physischen Constitution des Körpers, d. h. von dem mehr oder minder grossen und von dem mehr oder minder regelmässigen Abstande seiner Massentheilchen abhängen, ob das eine oder andere Wellensystem durch Interferenz vernichtet und somit aus dem zusammengesetzten Wellenzuge, der als sog. weisses Licht auf den Körper fällt, verschwinden wird.

Wenn sich jedoch in einem Körper die durch Interferenz herbeigeführte Schwächung auf alle homogenen Aetherwellen, die aus dem weissen Lichte hervorgehen können, möglichst gleichmässig erstreckt, wird aus diesem Körper ein getrübtes Weiss hervorstrahlen. Hat man aber ein inniges Gemenge verschiedenartiger Körpertheilchen, die beträchtliche Unterschiede hinsichtlich auf den Abstand ihrer kleinsten Massentheilchen und die Dichte des zwischen den letzteren gruppirten Aethers darbieten; so werden sich die einfallenden Aetherwellen bei ihrem Uebergange von

einem dieser Körpertheilchen zum anderen gewiss anders verhalten müssen wie in einem Körper, dessen sämmtliche Massentheilchen dieselbe Beschaffenheit besitzen. Jener Fall erinnert an die Gemenge verschiedener durchsichtiger Körper, deren Brechungsexponenten sehr ungleich sind. In solchen Gemengen findet, während das weisse eindringende Licht aus einem durchsichtigen Körpertheilchen in ein anderes von verschiedener Dichte überzugehen strebt, eine öfter wiederholte totale Reflexion desselben statt, weshalb denn auch solche Gemenge in einem blendenden Weiss erscheinen (§. 60).

124. Nochmals kehren wir hier zu den im §. 61 ff. näher besprochenen Fluorescenzerscheinungen zurück. Wir fanden dort, dass Strahlen von einem hohen Grade der Brechbarkeit, wenn sie in gewisse Substanzen eindringen, in diesen zu andern Strahlen von geringerer Brechbarkeit und damit auch zu gewissen Farbenerscheinungen Anlass geben. So können die sog. ultravioletten Strahlen, die also jenseits des Violetts im Sonnenspectrum liegen, in verschiedenen Substanzen Strahlen von geringerer Brechbarkeit, nämlich die sog. blauen, zur Erscheinung bringen. Dies heisst nun in der Sprache der Undulationstheorie: Aetherwellen von sehr kurzer Wellenlänge und sehr geringer Schwingungsdauer geben in den betreffenden Substanzen Anlass zur Entstehung anderer Aetherwellen von grösserer Wellenlänge und Schwingungsdauer; denn der Grad der Brechbarkeit eines Lichtstrahles ist ja, wie wir wissen, durch die Grösse der Schwingungsdauer, also durch die Zeit bedingt, welche die den Strahl bildenden Aethertheilchen zur Vollendung einer ganzen Schwingung erfordern, während die Wellenlänge die Strecke ist, durch welche sich die schwingende Bewegung des Aethers in der Zeit fortpflanzt, worin ein Aethertheilchen eine ganze Schwingung vollführt. Bei dem Fluorescenzphänomen findet aber, um es nochmals hervorzuheben, keine eigentliche Umwandlung von Strahlen grösserer Brechbarkeit in solche von geringerer Brechbarkeit statt, sondern jene geben nur bei ihrem Eindringen in die fluorescirende Substanz den Anstoss zur Entstehung neuer Strahlen von einem geringeren Grade der Brechbarkeit.

125. Nun hat Stokes*) die Fluorescenzerscheinungen durch

*) s. S. 106 d. W.

die Annahme zu erklären versucht, dass die sehr brechbaren Strahlen des Spectrums die kleinsten Molecule der fluorescirenden Substanz in eine schwingende Bewegung versetzen, ähnlich der, worin sich die Molecule der leuchtenden Körper befinden mögen. Diese Schwingungen der Molecule erregen dann in dem umgebenden Aether neue Wellen, die eine grössere Schwingungsdauer, d. h. geringere Brechbarkeit als die einfallenden primären Wellen besitzen. Dagegen bringt W. Eisenlohr*) die Fluorescenzfarben in Analogie mit den bekannten Combinationstönen, die unter gewissen Umständen aus dem Zusammentreffen weier Töne entstehen, welche einzeln höher sind, d. h. aus kürzeren Schallwellen bestehen, als der aus ihnen resultirende Combinationston. So soll in ähnlicher Weise aus der Interferenz zweier Aetherwellen von verschiedener Schwingungsdauer eine neue Aetherwelle von grösserer Schwingungsdauer hervorgehen. Das Licht überhaupt ist aber ein Gemisch aus leuchtenden und nichtleuchtenden Wellensystemen, unter denen die letzteren theils länger sind als die Wellen des Roth, theils kürzer als die des Violett. Nun denkt sich Eisenlohr die ultravioletten Strahlen, die in dem Raume neben dem Violett des Spectrums vorkommen, als bestehend aus unzähligen Wellensystemen, die bei verschiedener Wellenlänge alle eine kürzere Schwingungsdauer als die Wellen des violetten Lichtes haben. Durch ihre Interferenz entstehen Wellen von grösserer Länge als die ihrigen und bei ihrer grossen Mannigfaltigkeit Combinationsfarben von nicht minder grosser Anzahl. Daher können in manchen Fällen alle Arten von leuchtenden Wellen zumal hervortreten, die dann in ihrer Zusammensetzung Weiss geben, während in anderen Fällen in der Mischung der Combinationsfarben eine gewisse Farbe vorherrscht, die ihren Grund theils in der Mischung der ursprünglichen Wellen, theils in dem Abstande der reflectirenden Atomschichten der fluorescirenden Substanz haben wird. Hingegen ist in dem dunklen Raume des Spectrums neben dem Roth keine Fluorescenz zu erwarten; denn die rothen Strahlen bestehen aus den längsten Aetherwellen, die in dem für uns sichtbaren Theil des Spectrums vorkommen. So können aus der Combination derjenigen Aetherwellen, welche die rothen und gelben Strahlen bedingen, nur Aetherwellen hervorgehen, die eine grössere Wellen-

*) Poggend. Ann. Bd. XCIII. S. 623.

länge und Schwingungsdauer als die rothen Strahlen besitzen, und darum nicht sichtbar sind.

Die Schwingungszahl eines Combinationstones ist bekanntlich gleich der Differenz zwischen den Schwingungszahlen der primären Töne. Wollte man nun die Vergleichung zwischen den Combinationstönen und den durch verschiedene Arten von ultravioletten und anderen Wellen entstehenden Combinationsfarben ganz streng nehmen, so müsste die Schwingungszahl der Aethertheilchen in der Welle, welche die Fluorescenzfarbe bedingt, gleich sein der Differenz zwischen den Schwingungszahlen der ursprünglichen Aetherwellen. Doch bemerkt Eisenlohr ausdrücklich, dass man den Vergleich nicht buchstäblich in diesem Sinne zu nehmen habe; es genüge, sich die Fluorescenzfarben in ähnlicher Weise entstanden zu denken wie die Combinationstöne aus der Interferenz zweier Schallwellensysteme von verschiedener Schwingungsdauer. Indessen wollen wir noch hinzufügen, dass es nach den Untersuchungen von Helmholtz*) auch sog. Summationstöne giebt, deren Schwingungszahl gleich der Summe der Schwingungszahlen der primären Töne ist. Vielleicht liesse sich auch hier eine Analogie im Gebiete des Lichtes herausstellen, falls es sich nämlich finden sollte, dass Strahlen von geringerer Brechbarkeit unter gewissen Umständen das Entstehen von Strahlen grösserer Brechbarkeit veranlassten.

126. Obschon nun das Fluorescenzphänomen nach beiden Ansichten, sowohl nach der von Stokes als auch nach der von Eisenlohr, im Allgemeinen verständlich ist, so bleiben doch im Besonderen noch mancherlei Schwierigkeiten zurück. Ohne Zweifel muss die Constitution der fluorescirenden Substanz, d. h. die Gruppirung ihrer Atome und Massentheilchen, einen besonderen Einfluss üben, wie dies auch Eisenlohr anzuerkennen scheint, wenn er den Abstand der reflectirenden Atomschichten als die Erscheinung zum Theil bedingend hervorhebt. Bei der viel Wahrscheinlichkeit bietenden Ansicht von Stokes kommt noch die Leichtigkeit in Betracht, mit welcher die Atome der betreffenden Substanzen durch die die Fluorescenz veranlassenden Strahlen in Schwingungen eigenthümlicher Art versetzt werden können, sowie es auch bedeutsam ist, dass gerade die brechbarsten durch ihre chemische Wirksamkeit charakterisirten Strahlen das Phänomen sehr intensiv zu bewirken vermögen.

*) Poggend. Ann. Bd. XCIX. S. 497.

127. Schliesslich sei noch an die innige Analogie zwischen Licht und Wärme erinnert, die so weit geht, dass die Wärmestrahlen wohl zweifellos gleich den Lichtstrahlen auf Schwingungen desselben Aethers beruhen, und zwar auf Schwingungen, die gleichfalls senkrecht (transversal) zur Fortpflanzungsrichtung der Strahlen sind; denn die Wärmestrahlen werden in ganz ähnlicher Weise wie die Lichtstrahlen reflectirt, einfach und doppelt gebrochen, polarisirt und gebeugt. Die dunklen Wärmestrahlen aber, die mit den leuchtenden zugleich einer Lichtquelle entströmen, unterscheiden sich von den letzteren durch ihre grössere Wellenlänge und Schwingungsdauer, worin auch der Grund liegt, dass sie mittelst des Auges nicht als Licht empfunden werden können, sei es nun, dass sie von den optischen Medien des Auges eine Absorption erfahren, oder dass sie die Nervenhaut des Auges, in Folge einer zu geringen Geschwindigkeit der sie bedingenden Aetheroscillationen, nicht in entsprechender Weise zu afficiren vermögen. Diese nicht leuchtenden langen Wellen schliessen sich dem Roth des Spectrums an, und wir wissen ja auch, dass das Maximum der Wärme im Spectrum des Sonnenlichtes noch jenseits der rothen Strahlen liegt.

So lange nun eine Wärmequelle derartige längere Aetherwellen von geringer Schwingungsdauer erregt, erscheint sie dunkel; gesellen sich aber bei steigender Temperatur zu diesen Wellen noch andere von kürzerer Schwingungsdauer, also von grösserer Oscillationsgeschwindigkeit der zugehörigen Aethertheilchen, so wird dieselbe sichtbar. — Mit diesen Bemerkungen über die Wärmestrahlen wollen wir uns begnügen, da es nicht in unserer Absicht liegen kann, auch diesen Gegenstand hier weiter zu verfolgen.



Zweite Abtheilung.

Physiologische Optik.



Erstes Kapitel.

Das Auge.

129. Das Organ des Gesichtssinnes ist der seiner äusseren Gestalt nach fast kugelförmige Augapfel (bulbus oculi), dessen Sitz, die Augenhöhle (orbita), eine durch verschiedene Knochen des Schädels und Gesichtes gebildete und reichlich mit Fett und Zellgewebe versehene Vertiefung ist. Derselbe besteht im Wesentlichen aus drei Häuten: der Faser-, Gefäss- und Nervenhaut, und aus einem von diesen Häuten gebildeten Hohlraume, welcher mehrere lichtbrechende Medien: die wässerige Feuchtigkeit, die Krystalllinse und Glasfeuchtigkeit (Glaskörper) enthält.

I. Die Häute des Auges.

130. Die äussere **harte Faserhaut** (tunica sclerotica s. albuginea) bildet die eigentliche Form des Augapfels, schliesst die übrigen Theile des letzteren ein und dient zur Anheftung der Augenmuskeln. Sie ist eine weisse, sehr derbe und feste bindegewebige Haut, die vom hinteren Umfange des Auges, wo sie mit der Scheide des Sehnerven *nn* (Figur 107*)) zusammenhängt, nach vorn zu allmälig dünner wird und ohne Unterbrechung in die Hornhaut *cc* übergeht, nachdem sie durch Vereinigung mit der Sehne der ge-

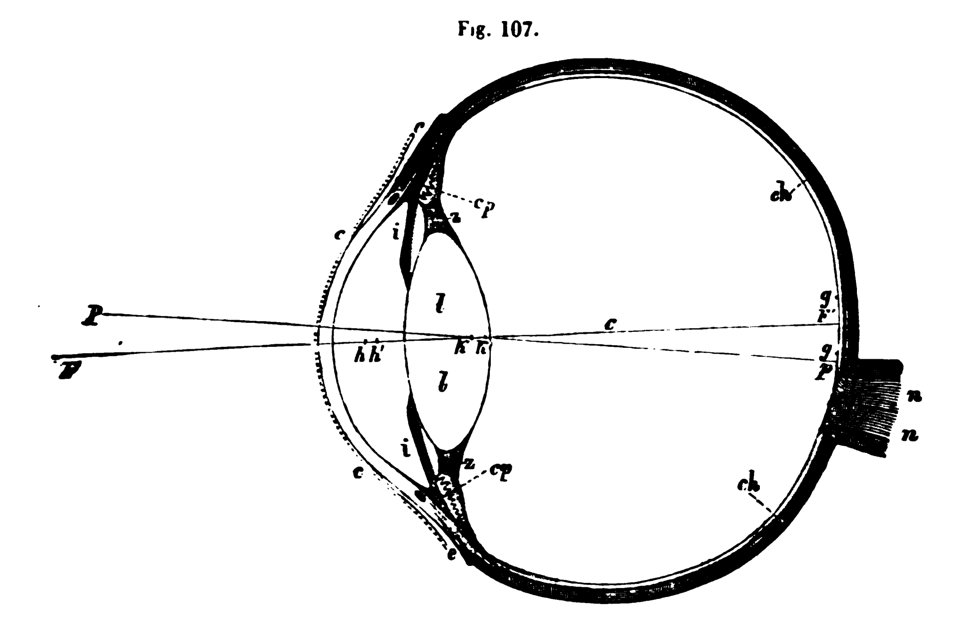
---

*) Dieselbe ist ein horizontaler Durchschnitt des Auges in etwa dreimaliger Vergrösserung und dürfte in der Hauptsache den neuern anatomischen Untersuchungen entsprechend dargestellt sein. — S. Brücke, die anatomische Beschreib. des menschl. Augapfels, Berlin 1847, u. Arlt, zur Anatomie des Auges in Gräfe's Archiv für Ophthalmologie, Bd. III. Abthl. II., 1857, S. 87.

raden Augenmuskeln wieder etwas stärker geworden ist. Hergestellt ist sie aus den zu Bündeln vereinigten Fasern des Bindegewebes, die durch zahlreiche Anastomosen zu einem dichten Flechtwerk verbunden sind.

Die durchsichtige Hornhaut (cornea) befindet sich am vor-

Fig. 107.



deren Theil des Augapfels (*ck*, Fig. 107) und hat eine grössere Convexität als die übrigen peripherischen Theile des letzteren; daher sie etwas hervorragt und dem Auge das Ansehen einer Kugel gibt, an deren vorderer Seite der Abschnitt einer kleineren Kugel befestigt ist. Sie ist noch dicker als die Sclerotica, mit der sie, wie schon bemerkt, in continuirlichem Zusammenhange steht, und besitzt eine blätterige Structur, insofern die Bündel ihrer Fasersubstanz alle glatt und mit der Oberfläche parallel sind, wodurch es, nach einer Bemerkung von Kölliker*), auch bedingt ist, dass die Hornhaut sehr leicht in der Richtung der Fläche sich zerreissen und durchstossen lässt, dagegen sehr schwer in der

*) Mikroskopische Anatomie, Leipzig 1854, Bd. II., zweite Hälfte, S. 610.

Dicke. Genau genommen ist sie aus drei besonderen Lagen zusammengesetzt, von welchen die stärkste, die eigentliche Hornhaut, auf die eben bezeichnete Weise aus einer dem Bindegewebe der Sclerotica ähnlichen Fasersubstanz besteht, während die beiden anderen Lagen (*e*), nämlich die Bindehaut (conjunctiva corneae) und Descemet'sche Haut (auch Wasserhaut genannt) von einem Epithelium und einer structurlosen Membran gebildet werden.

131. Die innere Fläche der Sclerotica bis zum Rande der Cornea ist mit der Gefäss- oder Traubenhaut (tunica vasculosa s. uvea) bedeckt, deren grösserer hinterer Theil insbesondere die Aderhaut (choroidea) und ihr vorderer, kleinerer Theil die Regenbogenhaut (iris) heisst.

Die Choroidea *ch*, die in der Figur durch Querstriche angegeben ist, erstreckt sich von der Eintrittsstelle des Sehnerven, wo sie eine runde Lücke darstellt (foramen opticum choroideae), nach Kölliker *), als eine $\frac{1}{15}$ — $\frac{1}{20}$''' dicke, leicht zerreissbare Haut bis in die Gegend des vorderen Randes der Sclerotica, woselbst sie einen dickeren Theil, das corpus ciliare (*cp*, Fig. 107) bildet und dann continuirlich in die Iris (*ii*, Fig. 107) übergeht. Man kann an derselben zwei Haupttheile unterscheiden, nämlich eine gefässreiche äussere Schicht, die eigentliche Aderhaut, und eine innere gefärbte Lage, das schwarze Augenpigment. Genauer besehen zerfällt die erstere (Aderhaut) wieder in drei nicht scharf begrenzte Abtheilungen: in eine äussere braune, weiche Lamelle, die äussere Pigmentschicht, welche die Ciliarnerven und langen Ciliargefässe trägt und vorn den musculus ciliaris enthält, 2) in die minder gefärbte eigentliche Gefässlage, und 3) in eine farblose zarte, ein äusserst reiches Capillarnetz enthaltende innere Lage. — Der musc. ciliaris oder tensor choroideae erscheint als eine Schicht von glatten radialen Muskelbündeln, die vom vordersten Rande der Sclerotica nach dem corpus ciliare (*cp*, Fig. 107) gehen und in dessen vorderer Hälfte sich verlieren. Es geschieht dies da, wo die Strahlenfortsätze (processus ciliares) sitzen, die im Wesentlichen aus demselben Grundgewebe (Stroma) wie die übrige Choroidea bestehen, und deren Windungen und Querfalten in Fig. 107 durch die zackige starke Linie angedeutet sind.

Die ganze innere Fläche der Choroidea ist von dem schwarzen

---

*) a. a. O. S. 628.

Pigment: einer Lage dicht aneinander befindlicher, fast regelmässig sechsseitiger Zellen (Pigmentzellen) bedeckt, die mit sehr kleinen, länglich runden Körperchen angefüllt sind.

132. Die mit der Choroidea direct zusammenhängende **Iris** (Blendung), *ii*, Fig. 107, liegt hinter der Hornhaut, ungefähr wie das Zifferblatt einer Uhr hinter dem Uhrglase, und hat nahe in ihrer Mitte zum Durchgange der Lichtstrahlen eine kreisrunde Oeffnung, die **Pupille** oder das **Sehloch**. Die Iris enthält viel eigentliches Bindegewebe, das im Verein mit zarten, lockigen, mehrfach miteinander verflochtenen Bündeln die Hauptmasse ihres Stromas ist, worin die sehr zahlreichen Blutgefässe und Nerven der Iris, sowie auch die zugehörigen Muskeln verlaufen. Die letzteren, von derselben (glatten) Beschaffenheit wie die der Choroidea, bilden beim Menschen einen deutlichen Schliessmuskel der Pupille (sphincter pupillae) in Form eines $\frac{1}{4}'''$ breiten, genau am Pupillenrande der Iris befindlichen und der hinteren Fläche näheren platten Ringes. Ausser diesem grösseren Muskelringe findet Kölliker*) noch einen ganz schmalen, der vorderen Irisfläche näheren Muskelring von nur $\frac{1}{40}'''$ Breite. Sodann existiren nach der Angabe vieler Anatomen auch noch **radiäre Muskelfasern** (dilitator pupillae, nach Brücke), so dass die Pupille durch jene ringförmigen Muskelbänder verengert, durch diese radiären Fasern aber erweitert werden kann. Auch Kölliker nimmt die Existenz solcher radiärer Muskelfasern an, die nach ihm keine zusammenhängende Muskellage bilden, sondern in Gestalt vieler schmaler, hie und da netzförmig unter spitzen Winkeln sich vereinender Bündel vom äusseren Rand der Iris bis zum Sphincter pupillae verlaufen.

Die hintere Fläche der Iris bis zum Rande der Pupille ist von einer Pigmentschicht überzogen, die einen dunklen Hintergrund darbietet, vor welchem das weisslich trübe Medium des halbdurchsichtigen Gewebes der Iris selbst in blauer Farbe erscheint, welche letztere also hier nicht von einem besonderen Pigment der Iris herrührt. Alle Augen, bei denen nur die hintere Fläche der Iris mit schwarzem oder braunschwarzem Pigment (in den Zellen der Pigmentschicht) versehen ist, erscheinen blau, während die Iris, wenn sich dieses Pigment auch in ihren vorderen Schichten, im Stroma der Haut, ablagert, mehr oder minder braun und selbst

*) a. a. O. S. 638.

schwarz erscheint. Da Kinder, wie es heisst, stets mit blauen Augen geboren werden, so findet sich bei ihnen nur an der hinteren Irisfläche, d. h. in der eigentlichen Pigmentschicht, jener dunkle Farbstoff, der sich dann später, wenn die Augen überhaupt andersfarbig werden, auch noch anderweitig, im Stroma der Haut, absetzt. Dagegen fehlt bei den Kakerlaken oder Albinos die Pigmentschicht ganz, weshalb hier die Iris eine blassrothe Färbung zeigt, die von dem durchscheinenden Blute der Gefässe herrührt.

133. Die dritte Haut des Auges, die innerste, ist die Nerven- oder Netzhaut (retina), in Fig. 107 durch die innerste der Gefässhaut concentrisch verlaufende Linie bezeichnet, schliesst sich der Gefässhaut an und erstreckt sich von der Eintrittsstelle des Sehnerven bis an den hinteren Rand der processus ciliares, wo sie mit einem wellenförmigen Rande (ora serrata retinae) endigt. Dieselbe stellt sich im Leben als ein zartes, durchsichtiges, im Tode als ein weissliches, undurchsichtiges Häutchen dar, dessen Dicke, von der Eintrittsstelle des Sehnerven an gerechnet, anfänglich etwa 0,1''' beträgt, aber bald merklich geringer wird, so dass sie nahe an ihrem vorderen Rande nur noch 0,04''' stark ist, und endlich fast ganz scharf ausläuft. Sie verräth einen sehr complicirten Bau. Ueberall, mit Ausnahme der Eintrittsstelle des Sehnerven, lassen sich an ihr von aussen nach innen, d. h. von der Gefässhaut nach der inneren Oberfläche der Retina hin, folgende Schichten unterscheiden, die nebenstehende Figur *), — ein senkrechter Durchschnitt der menschlichen Retina, nahe am Opticuseintritt, 350mal vergrössert, — andeutet. 1. Schicht der Stäbchen und Zapfen, 2. äussere Körnerschicht, 3. Zwischenkörnerschicht, 4. innere Körnerschicht, 5. feinkörnige graue Lage, 6. Ner-


Fig. 108.



*) Retinatafel in Ecker's Icones physiologicae; Kölliker: Mikrosk. Anatomie, Bd. II., Abth. 2, S. 679.

venzellen in einfacher Schicht, 7. Opticusfaserbündel im Querschnitt, 8. radiäre Fasern, dünne Blätter zwischen den Bündeln der Opticusfasern bildend, 9. Enden der radiären Fasern, 10. Begrenzungshaut (membrana limitans).

134. Die Schicht der Stäbchen und Zapfen (membrana Jacobi) besteht aus einer sehr grossen Anzahl stäbchen- und zapfenförmiger Körperchen, die das Licht stark reflectiren. Die eigentlichen Stäbchen (bacilli) werden beim Menschen als cylindrische, schmale Körperchen beschrieben, die in der ganzen Dicke der Stäbchenschicht überall dieselbe Breite besitzen und am inneren Ende mit einem dünnen Ausläufer in die Körnerschicht übergehen. Ihre Breite beträgt 0,0008''' und ihre Länge 0,028 — 0,036'''. Die Substanz derselben ist hell, homogen mit schwachem Fettglanz, sehr weich, biegsam und doch leicht brechend. Die Zapfen (coni) sind zapfen- oder kegelförmige Körperchen von etwa 0,0025''' Breite. Ihre Substanz erscheint frisch fast homogen oder äusserst fein granulirt und glänzend, heller als die der Stäbchen, verändert sich aber eben so leicht als diese, und ist nach Kölliker*) ein System kernhaltiger Zellen, während die Stäbchen nach demselben zarte, mit eiweissartigem zähem Inhalt gefüllte Röhren sind; wogegen Hannover**) die Stäbchen für solide Körper erklärt. Nach aussen hin verschmälert sich der Zapfen zu einem gewöhnlichen Stäbchen, das ungefähr eben so lang als er selbst ist, während dasselbe nach innen zu in eine kürzere birnförmige Anschwellung übergeht, die nach einer zuerst von H. Müller gemachten Wahrnehmung bereits der Körnerschicht angehört. Kölliker nennt diese kernhaltige Anschwellung das Zapfenkorn, und sie ist als der eigentliche Zellenkörper des Zapfens zu betrachten.

Fig. 109.

Nebenstehende Figur zeigt die Elemente der Stäbchenlage

*) a. a. O. S 652 u. 657.

**) Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie, V. S. 23.

im Zusammenhange mit den radiären Fasern, 350mal vergrössert. 1. Zapfen mit radiären Fasern. *a.* Dickerer Theil des Zapfens oder eigentlicher Zapfen, *b.* Stäbchen auf demselben, der eine länger, *c.* ringförmiges Leistchen am inneren Ende des Zapfens, *d.* kerntragende Anschwellung (Zellenkörper) desselben, bereits in der äusseren Körnerlage, *e.* radiäre Faser, in welche dieselbe sich fortsetzt, *e'.* seitlicher, nach innen tretender Ausläufer; *f.* Korn (Zelle) der inneren Körnerlage, *g.* inneres Ende der radiären Faser. 2. Stäbchen mit radiären Fasern. *a.* Stäbchen, *b.* Querleistchen am inneren Ende desselben, *c.* Anfang der radiären Fäden, *d.* Körner der äusseren Körnerlage, eines am Stäbchen dicht ansitzend, *e.* radiäre Fasern in der Zwischenkörnerschicht, *f.* innere Körner, *f'* ein Korn mit einem äusseren Ausläufer, *g.* innere Enden der radiären Fasern. 3. Ein inneres Korn *a.* mit drei Ausläufern, von denen der äussere sich verästelt und mehrere äussere Körner *b.* und Stäbchen trägt, von welchen nur eines *c.* gezeichnet ist.

Die sog. radiären Fasern, welche die Netzhaut senkrecht durchsetzen, wurden 1851 von H. Müller*) in Würzburg bei Thieren entdeckt und ein Jahr später von Kölliker auch beim Menschen nachgewiesen. Von jedem Zapfenkorn (*d.* Fig. 109) geht ein feiner blasser Faden *e* (radiäre Faser) von 0,0004 — 0,0006''' Breite nach innen fort, der, nachdem er in geradem Laufe die äussere Körnerlage und die Zwischenkörnerschicht (2. und 3. Fig. 108) durchsetzt hat, in der inneren Körnerschicht endet, um hier mit einem Korn dieser Schicht (Fig. 109 *f*) in Verbindung zu treten. Aehnliches gilt für die Stäbchen; nur scheinen die meisten derselben sich zunächst in eine längere oder kürzere Spitze auszuziehen und dann erst mit einem Korn zu verbinden. Häufig ist es so, wie in Fig. 109 3, wo mehrere von den Körnern abgehende Fädchen sich allmälig zu einem etwas stärkeren Faden vereinigen, der durch die Zwischenkörnerlage in die innere Körnerschicht eintritt, um sich mit deren Elementen zu verbinden. Die radiären Fasern erstrecken sich von der innere Körnerschicht durch alle inneren Lagen der Retina und stossen mit ihren abgestutzten Enden an die membrana limitans. Bei ihrem Verlauf durch die Optikusfaserlage nehmen sie vorzugsweise

*) Anatomisch-physiologische Untersuchungen über die Retina des Menschen und der Wirbelthiere, Leipzig 1856.

die Lücken ein, welche die plexusartig sich vereinenden Bündel der Sehnervenfasern zwischen sich lassen.

135. In der äusseren Körnerschicht (Fig. 108 2) hat man zwei verschiedene Elemente wahrgenommen, nämlich die Stäbchen- und Zapfenkörner. Jene, die mit den Stäbchen in Verbindung stehen, sind sekr kleine Zellen, die anderen, welche mit den Zapfen verbunden sind, erscheinen etwas grösser als senkrecht ovale oder birnförmige Zellen mit kernförmigem Inhalt.

Die Zwischenkörnerschicht (Fig. 108 3) ist durch eine radial faserige Structur charakterisirt; sie besteht aus den bereits mehr erwähnten, die Netzhaut senkrecht durchsetzenden Radialfasern und einer homogenen, feinkörnigen Substanz zwischen denselben.

Die innere Körnerschicht (Fig. 108 4) besteht aus kleinen Zellen, die etwas grösser als die der äusseren Körnerschicht und daher leichter mit ihrem kernförmigen Inhalt wahrzunehmen sind. Viele dieser inneren Körner sind in Radialfasern eingelagert, so dass diese, wie H. Müller*) bemerkt, als Verlängerungen derselben erscheinen. Und Kölliker**) glaubt auch hier zwei Elemente unterscheiden zu müssen, nämlich innere Stäbchen- und innere Zapfenkörner (Fig. 109, *f* in 1 u. 2) von denen sich die ersteren mit den Ausläufern der Stäbchen und die letzteren mit den Ausläufern der Zapfen verbinden.

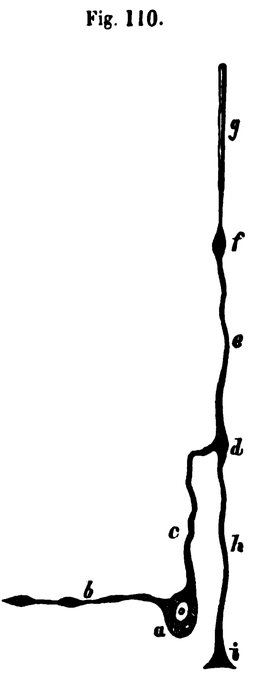
Die feinkörnige graue Lage, granulöse Schicht (Fig. 108 5) ist dem Anscheine nach eine feine und blass granulirte, fast homogene Masse, die nach H. Müller der granulirten Substanz in der Rinde des Gehirns sehr ähnlich ist. Sie enthält aber auch viele feine Fäserchen, nämlich die schon betrachteten Radialfasern und dann Ausläufer der in der nächsten Schicht gelegenen Zellen.

Die Schicht der Nervenzellen (Fig. 108 6) besteht grösstentheils aus Zellen, die mit denen des Gehirns die grösste Aehnlichkeit haben. Dieselben erscheinen nach Pacini im frischen Zustande homogen durchscheinend mit einem bläschenförmigen Kern. Ihre Grösse variirt zwischen 0,01 — 0,03 Millimeter. Diese Zellen sind mit Fortsätzen versehen, durch welche sie auf der einen Seite mit den Fasern des Sehnerven, auf der anderen mit den Körnern in

*) a. a. O. S. 55.
**) a. a. O. S. 663.

Verbindung stehen. Dieser Zusammenhang der Nervenzellen mit den Opticusfasern wurde zuerst von Pacini angedeutet und dann von Corti*) auf Grund seiner Beobachtungen an Säugethieren, namentlich an der Retina des Elephanten, bestimmt behauptet. Hierauf folgten bestätigende Beobachtungen von H. Müller an Vögeln und Fischen und später an der Retina des Menschen, während inzwischen auch Kölliker fand, dass gewisse Fortsätze der Nervenzellen, wenigstens zum Theil in ächte Opticusfasern übergehen. So hängen die Nervenzellen einerseits mit den Fasern des Sehnerven (nervus opticus) und durch andere nach aussen, d. h. nach der Choroidea, gerichteten Fortsätze mit den innern Körnern zusammen. Nebenstehendes Schema versinnlicht den Zusammenhang der Zellen, Stäbchen (resp. Zäpfchen) und Radialfasern. *a* ist eine Nervenzelle, durch einen horizontalen Fortsatz in Verbindung mit der Opticusfaser *b*; — *c* äusserer Fortsatz der Zelle mit einem innern Korn *d* zusammenhängend, *e* Radialfaser, die von *d* aus zu einem äussern Korn *f* und Stäbchen *g* geht, *h* inneres Ende der Radialfaser mit der Anschwellung *i*.

Fig. 110.



136. Die Schicht der Sehnervenfasern (Fig. 108 7) erscheint als eine Ausbreitung des nervus opticus, der durch eine Oeffnung der Sclerotica und Gefässhaut etwas nach innen, von der Mitte des Augengrundes an gerechnet, in den Augapfel tritt (Fig. 107), wo seine Scheidewand sich in der Sclerotica verliert, während seine Fasern sich nach allen Seiten ausbreiten und durch Verflechtung eine membranöse Schicht bilden, die sich bis zur ora serrata retinae (§. 133) erstreckt und von hinten nach vorn allmälig an Dicke abnimmt. Die in dieser Schicht vorkommenden

*) Müller's Archiv 1850, S. 274; insbesondere Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie, V.

**) a. a. O. S. 666.

Faserbündel sind grösser an Zahl als die im Sehnervenstamm, und nicht von eigenen Scheiden, sondern nur durch die zwischen ihnen zur membrana limitans gehenden Radialfasern getrennt. Dieser Mangel an Scheiden um die einzelnen Bündel bringt es mit sich, dass die Fasern des Sehnerven im Innern des Auges blässer, nämlich graulich durchscheinend werden; was sie aber von anderen blassen Nervenfasern unterscheidet, ist, wie Kölliker*) sagt, der Mangel an Kernen in ihrem Verlauf, ein etwas stärkeres Lichtbrechungsvermögen und das in der Leiche fast constante Vorkommen von regelmässig spindelförmigen, in grösseren oder kleineren Abständen vorkommenden Varicositäten, aus welchen letzteren Momenten Kölliker auf einen zähflüssigen und vielleicht auch noch etwas fetthaltigen Inhalt schliessen zu müssen glaubt, so dass die Nervenfasern der Retina den zartesten Elementen des Gehirnes an die Seite zu stellen wären. Ihre wahre Endigung finden aber die Sehnervenfasern nach dem bereits (§. 135) Mitgetheilten sehr wahrscheinlich in den Nervenzellen der Retina.

Die Eintrittsstelle des Sehnerven, — an welcher, wie schon hervorgehoben ist, alle übrigen Elemente der Retina fehlen, — zeigt gegen den Glaskörper hin eine Erhöhung (colliculus nervi optici), die in der Mitte mit einer kleinen Vertiefung versehen ist und sich durch Verdünnung der Nervenschicht sehr rasch im Umkreise der Eintrittsstelle verliert. Den Durchmesser der Eintrittsstelle fand H. Müller*) in einem Auge = 1,6 — 1,7 Millimeter, in einem anderen = 1,5 — 1,68^{mm}.

Die Begrenzungshaut (membrana limitans) endlich, Fig. 108 10, ist ein sehr feines seröses Häutchen, das die ganze Innenfläche der Retina überzieht und mit den inneren Enden der Radialfasern im Zusammenhange steht.

137. Eine Retinastelle von besonderer physiologischer Dignität ist der sog. gelbe Fleck (macula lutea retinae), der Mitte der Hornhaut und Pupille gegenüber (*gg* Fig. 107), von goldgelber Farbe und nahezu elliptischer Gestalt. Seine Grösse wird ziemlich verschieden angegeben, was nicht befremden kann, da, wie H. Mül-

---

*) a. a. O. S. 670 f. — S. auch H. Müller a. a. O. S. 62 f.

*) a. a. O. S. 82. — Sonstige numerische Angaben hierüber finden sich bei E. H. Weber: Ueber den Raumsinn in den Berichten der königl. Sächs. Gesellsch., Leipz. 1852, und insbesondere bei Hannover: Das Auge etc. Leipzig 1852. S. 66.

ler*) bemerkt, bei Vergleichung mehrerer Augen individuelle Verschiedenheiten vorkommen, und auch in einem gegebenen Auge keine bestimmte Grenze des gelben Fleckes angegeben werden kann, weil die intensiv gefärbte Stelle, die gewöhnlich unter 1''' bleibt, von einem schwächer gelblichen Hofe umgeben ist, der sich bedeutend weiter erstreckt und ganz allmälig verliert. Nach Kölliker ist der gelbe Fleck, dessen inneres Ende 1,0 bis 1,2''' von der Mitte des Sehnerveneintritts abliegt, 1,44''' lang (nach E. H. Weber nur 0,338''') und 0,36''' breit. In seiner Mitte befindet sich eine verdünnte farblose, gewissermassen grubenartig vertiefte Stelle (fovea centralis), deren Grösse Michaelis**) zu 0,1 bis 0,2''' und Kölliker zu 0,08—0,1''' angiebt. Durch diese Stelle geht auch die Augen- oder Sehaxe (optische Axe des Auges), nämlich eine gerade Linie, die durch den Scheitel der Hornhaut nach der Mitte des gelben Flecks gezogen ist.

In diesem gelben Fleck, der scharfsichtigsten Gegend der Retina, fehlen, wie Henle***) zuerst fand und Kölliker bestätigte, die eigentlichen Stäbchen ganz, während die Zapfen, hier dünner und schlanker als an anderen Stellen, eine ganze zusammenhängende Lage bilden. Wohl mögen hier auf den Raum einer Quadratlinie 40000 bis 50000 Zäpfchen kommen, während ausserhalb der macula sich Zäpfchen untermengt mit Stäbchen vorfinden, und zwar so, dass in der nächsten Umgebung der macula je ein Zapfen nur von einer Reihe, weiterhin aber (gegen die ora serrata retinae) von mehreren Reihen von Stäbchen umgeben ist. Die Nervenzellen liegen am gelben Fleck in mehreren Reihen übereinander, sind im Durchschnitt kleiner als sonst, und durch ihre senkrecht verlängerte Form, sowie theilweise durch die Länge ihrer nach aussen gerichteten Fortsätze charakterisirt.****) Die Dicke der verschiedenen Retinaschichten am gelben Fleck giebt Kölliker †), wie folgt: Lage der Nervenzellen 0,045—0,052'', feinkörnige graue Lage 0,020''', innere Körnerschicht 0,026''', Zwischenkörnerschicht 0,039''', äussere Körnerlage 0,026''', Zapfen 0,030'''.

*) a. a. O. S. 83.
**) Nov. Acta. T. XIX. II. 1842. — Müller's Archiv für Physiol. 1837. XII. St.
***) Zeitschrift für rationelle Medicin, 1852, S. 304.
****) H. Müller a. a. O. S. 87 f.
†) a. a. O. S. 686.

Die Fasern des nervus opticus zeigen in der Nähe des gelben Flecks einen eigenthümlichen Verlauf, indem sie in langen Bogenlinien dahinziehen. Obwohl eine grosse Anzahl dieser Fasern in denselben eintritt und sich hier verliert, geht doch keine Faserlage über ihn hinweg; seine Oberfläche ist frei davon.

Wegen des grossen Reichthums der Nervenzellen im gelben Fleck lässt sich annehmen, dass hier je ein Zapfen mit einer Nervenzelle und durch diese mit einer Faser des Sehnerven in Verbindung steht, während gegen die ora serrata hin bei constanter Anzahl der Stäbchen sowohl die Nervenzellen als auch die Nervenfasern und inneren Körner an Zahl abnehmen, woraus zu entnehmen ist, dass auf den Seitentheilen der Retina nicht so viele Nervenzellen und Fasern als Stäbchen vorhanden sind, und daher mehrere Stäbchen mit nur einer Zelle und Nervenfaser verbunden sind.

Der gelbe Fleck besitzt keine Blutgefässe, wenigstens keine grösseren Aestchen und die fovea centralis ist ganz gefässlos. Die Gefässe der Retina kommen aber von der arteria centralis retinae, die innerhalb des nerv. opticus (*nn* Fig. 107) in das Auge tritt und hier mit vier bis fünf Gefässen seitlich ausstrahlt. Diese Aeste dringen, indem sie sich anfänglich dicht unter der membrana limitans spalten, durch die Nervenfaserschicht bis zur innern Körnerlage (4 Fig. 108) und breiten sich in baumförmigen Verästelungen bis zur ora serrata aus. Endlich gehen sie überall in ein Netz sehr feiner Capillaren über, das namentlich in der feinkörnigen grauen Lage und zum Theil auch in der Ausbreitung der Opticusfasern gelegen ist.

138. Es hat sich nun, namentlich durch die Bemühungen von Kölliker*) und H. Müller**) in Würzburg, die Ansicht geltend gemacht, dass die besprochenen Stäbchen und Zapfen das eigentliche lichtpercipirende Organ, d. h. dasjenige peripherische Organ sind, welches durch das Licht zunächst afficirt und in solche Erregungszustände versetzt wird, welche zum Centralorgane fortgepflanzt hier die Lichtempfindung zur Folge haben.

Diese Ansicht würde freilich nicht haltbar sein, wenn es wahr wäre, was Blessig in einer Abhandlung (de retinae dextura,

---

*) a. a. O. S. 690 ff.

**) a. a. O S, 97 ff.

Dorp. 1855) zu Tage gelegt hät. Nach ihm giebt es keine Radialfasern, welche die Körnerschicht durchsetzen; die Nervenzellen sind nur Bindegewebsmaschen, wie sich denn überhaupt nach seinen Beobachtungen fast nur Bindegewebe vorfindet, mit Ausnahme der Opticusfasern, welche die einzigen nervösen Elemente der Retina sein sollen. Indessen scheinen diese Wahrnehmungen Blessig's keine irgendwie entscheidende Bestätigung gefunden zu haben, daher wir hier an der von den oben Genannten aufgestellten Ansicht, die in vieler Beziehung so viel Ansprechendes hat und guter Gründe keineswegs entbehrt, festhalten können und müssen.

Schon Treviranus*) hielt die Stäbchenschicht im Hinblick auf die Lichtperception für bedeutsam, während man sonst gewöhnlich die Meinung hegte, dass die Fasern des nerv. opticus direct vom Lichte afficirt die Lichtempfindung im Centralorgan erregten. Allein die Eintrittsstelle des Sehnerven, die eben nur aus Fasern des letzteren besteht, ist blind; Lichtstrahlen, die auf dieselbe fallen, haben keine entsprechende Lichtempfindung zur Folge, was man nicht etwa auf die hier eintretenden Retinalgefässe zurückführen kann, da die Grösse der blinden Stelle im Auge diejenige des Durchmessers der vasa centralia beträchtlich übertrifft. Zwar wird wohl bei starker Beleuchtung der Eintrittsstelle, z. B. wenn das Bild einer Flamme auf dieselbe fällt**), eine diffuse Lichtempfindung erregt, die jedoch ihrer Intensität nach nicht der Annahme entspricht, dass die directe Affection der Sehnervenfasern zur Erzeugung der Lichtempfindung führe. Auch entsteht keine Lichtempfindung, wenn ein scharf begrenzter Lichtpunkt anf die Eintrittsstelle fällt, und überdies ist es sehr wahrscheinlich, dass jener schwache diffuse Lichtschein daher kommt, dass das von den beleuchteten Stellen in der Tiefe reflectirte Licht die sensibeln Elemente in der Umgebung des blinden Flecks trifft. An den übrigen Retinastellen bilden aber die Fasern, namentlich in der Nähe des gelben Flecks, eine so dicke Lage, dass ein Lichteindruck nothwendig eine grosse Anzahl von Fasern zugleich trifft, daher sich eine isolirte Einwirkung, wie sie zur deutlichen Auffassung der Bildpunkte eines Objects erforderlich erscheint, nicht wohl be-

*) Beiträge der Anatomie und Physiologie der Sinnesorgane, Bremen 1835 u. 1837.

**) s. Coccius: Anwendung des Augenspiegels, S. 20.

greifen lässt, während es auch sonst eben nicht annehmbar ist, dass eine Faser, wenn sie an verschiedenen Stellen gleichzeitig getroffen wird, verschiedene Empfindungen vermittelt.

Sodann fehlt gerade an der Retinastelle, welcher die feinste Lichtempfänglichkeit zukommt, nämlich am gelben Fleck und seiner Mitte, eine zusammenhängende, über die Oberfläche hingehende Lage von Opticusfasern.

Was von den Fasern des Sehnerven, gilt zum Theil auch von der Lage der Nervenzellen, wenn man dieselbe etwa als das nächste lichtpercipirende Organ betrachten wollte. Am gelben Fleck liegen sie vielfach geschichtet übereinander und daraus würde ebenso, wie bei den vielen sich deckenden Nervenfasern, eher eine Confusion als eine distincte Auffassung der Bildpunkte eines Objects resultiren können.

139. Dagegen bietet die Schicht der Stäbchen und Zapfen eine regelmässige, mosaikartige Anordnung dar, deren Elemente mit den Körnern und durch diese mit den Nervenzellen und Sehnervenfasern in ununterbrochenem Zusammenhange stehen. Auch sind die anatomischen, physikalischen und chemischen Merkmale der Stäbchen, Zapfen und Radialfasern von der Art, dass man diese Gebilde sehr wohl den nervösen Elementartheilen beizählen kann. So würden also die Lichtstrahlen, d. h. die Wellen des Aethers, zunächst in den Stäbchen und Zapfen einen Erregungszustand bewirken', der sich mittelst der Körner und Radialfasern zu den Nervenzellen und von diesen durch die Sehnervenfasern (vglch. §. 135, Fig. 110, S. 219) zu dem Centralorgan fortpflanzt, um hier die Lichtempfindung zu veranlassen. Freilich müssen die Lichtstrahlen, um die Stäbchenschicht, welche die äusserste oder in Bezug auf den Gang der Strahlen die hinterste Schicht der Retina ist, die verschiedenen Retinalagen durchsetzen, was jedoch insofern keine Schwierigkeit bietet, als die Retina, wenn auch nicht vollkommen, so doch in einem hohen Grade durchsichtig ist,*) was namentlich von der scharfsichtigsten Region, der Mitte des gelben Fleckes gilt. Vollkommen durchsichtig sind auch die optischen Medien des Auges nicht.

---

*) s. Kussmaul: die Farbenerscheinungen im Grunde des menschlichen Auges, 1845. S. 8.

Uebrigens kann man auch aus der Schattenfigur, welche die Gefässe der arteria centralis retinae unter gewissen Umständen darbieten*), mit einiger Evidenz entnehmen, dass die für das Licht zunächst sensible Retinaschicht mit der Lage der Stäbchen und Zapfen zusammenfällt. Denn diese Gefässe können als Schattenfigur nur insofern wahrgenommen werden, als die betreffende Schicht hinter denselben liegt, d. h. die Gefässe müssen, wenn von aussen her beleuchtet, ihre Schattenbilder auf die empfindliche Schicht werfen, falls sie wahrgenommen werden sollen. Diese Schattenbilder können aber darum nicht auf die Faserschicht des nerv. opticus fallen, weil dieselbe vor der Verästelung der arteria centralis gelegen ist. — Bewegt man die Lichtquelle, deren Strahlen die Gefässe der Retina beleuchten, so verändert auch die Schattenfigur ihre Stellung im Gesichtsfelde. Der Schatten zeigt bei dieser Bewegung eine erhebliche Parallaxe, und mit Rücksicht hierauf lässt sich die Entfernung der sensibeln Fläche von den Gefässen bestimmen. Diese Fntfernung beträgt nach einer von H. Müller **) vorgenommenen Messung und Berechnung 0,2 bis 0,3 Millimeter; ein Werth, der mit dem durch anderweitige Messung bestimmten Werthe für den Abstand der Stäbchen- und Zapfenschicht von den bezeichneten Gefässen merklich übereinstimmt.

Endlich liesse sich auch noch die Beziehung zwischen den kleinsten wahrnehmbaren Distanzen und der Grösse der Stäbchen und Zapfen allenfalls zu Gunsten der hier in Rede stehenden Ansicht geltend machen. Doch werden wir dies an einem anderen Orte besprechen.

Gegen die Bedeutung der Stäbchen und Zapfen in dem hier angegebenen Sinne hat sich Hannover***) erklärt, der in diesen Gebilden nur eine spiegelnde (katoptrische) Vorrichtung sieht, durch welche die Lichtempfindung in den Sehnervenfasern verstärkt und localisirt werde; besonders aber hat Brücke dargethan, wie zu diesem Behufe die Stäbchen und Zäpfchen wirksam werden

*) s. im 3. Capitel dieser Abtheilung unter d. entoptischen Gesichtserscheinungen.

**) Vgl. Verhandlungen der phys. medicinischen Gesellschaft zu Würzburg, Bd. V.

***) Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie, Bd. V., S. 17.

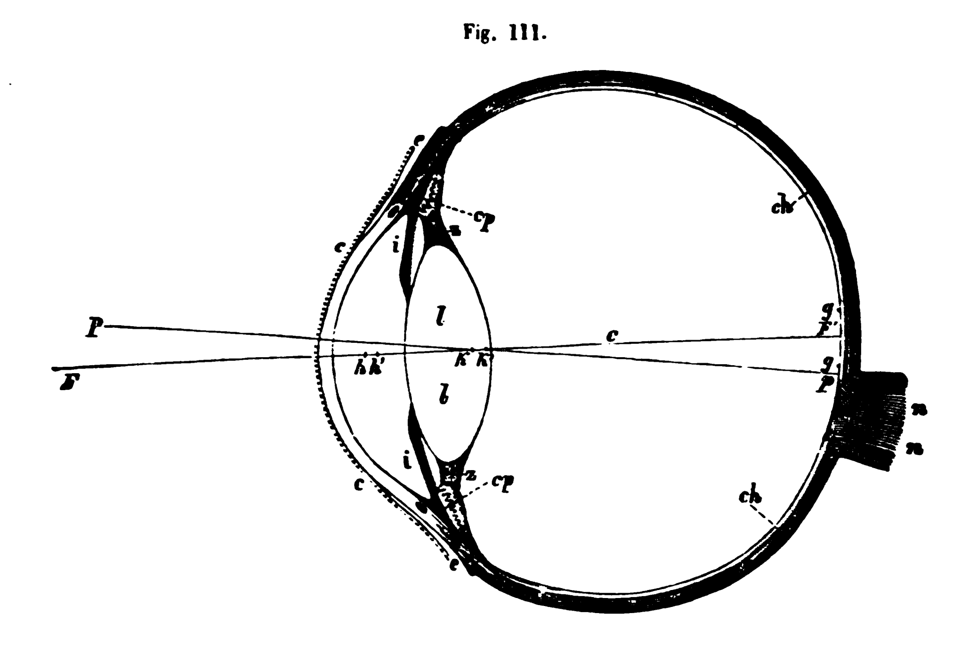
können. Auf welche Weise werden wir später sehen; hier sei nur noch bemerkt, dass diese Auffassung der Stäbchen und Zäpfchen als katoptrischer Vorrichtung sehr wohl vereinbar ist mit der oben besprochenen Ansicht, nach welcher dieselben das erste lichtpercipirende Organ sind.

II. Die optischen Medien des Auges.

140. Die lichtbrechenden Medien, die sich in dem von den Häuten des Auges umschlossenen Raume befinden, sind: die wässerige Feuchtigkeit, die Krystalllinse und Glasfeuchtigkeit (Glaskörper).

Die wässerige Feuchtigkeit (humor aquaeus) ist, Fig. 111, in dem Raume zwischen der Hornhaut *cc* und der Linse *ll*

Fig. 111.



enthalten, so dass sie die vordere Fläche der letzteren und die Irisfläche berührt. Sie ist wasserhell, farblos und besteht grössten-

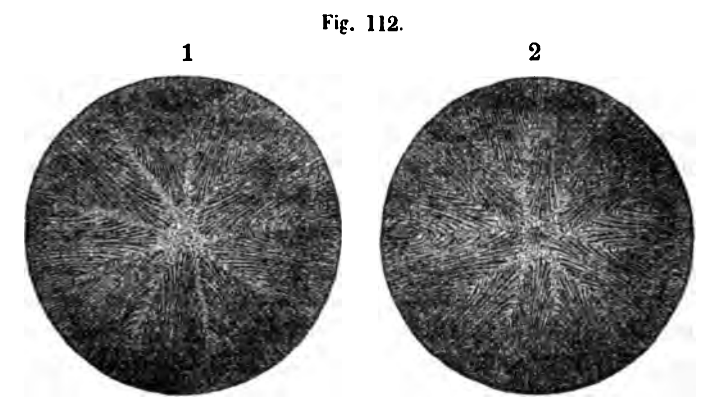
theils aus Wasser, worin sich eine geringe Menge verschiedener Salze und sehr wenig Eiweiss in Auflösung befindet.

Die Krystalllinse (lens crystallina) zeigt die Gestalt einer biconvexen Linse, deren hintere Fläche stärker als ihre vordere gekrümmt ist, und liegt in einem zarten, durchsichtigen, structurlosen und sehr elastischen Häutchen. Sie besteht durchweg aus langen, glatten, sechsseitigen, (nach der Angabe von Kölliker 10,0025 — 0,005''' breiten und 0,009 — 0,0014''') dicken Elementen, die physikalisch durch wasserklares Ansehen, grosse Biegsamkeit und Weichheit, sowie durch bedeutende Zähigkeit charakterisirt sind. Man nennt diese Elemente gewöhnlich Linsenfasern; sie sind jedoch, wenigstens in den äusseren Theilen der Linse, nichts als Röhren mit zähem, eiweissartigem Inhalt, und können daher, wie Kölliker bemerkt, auch Linsenröhren genannt werden. In den festeren inneren Schichten der Linse, dem Linsenkern, sind sie fester, schmäler und dunkler als in den weicheren äusseren Theilen. Dieselben constituiren die Linse durch einfache Aneinanderlagerung, indem sie sich mit ihren Flächen alle parallel zur Linsenoberfläche legen und mit ihren zugeschärften Rändern ineinandergreifen. Auf solche Weise entstehen nun wohl allerdings Schichten oder Lamellen, die wie die Blätter einer Zwiebel concentrisch übereinander liegen, aber doch nicht scharf und regelmässig begrenzt sind und auch nicht aus einer einzigen Lage von Linsenröhren bestehen. Regelmässiger noch soll die Anordnung der Linsenelemente nach der Richtung der Dicke sein, dergestalt, dass sie durch die ganze Linse hindurch einander decken und die letztere auch gedacht werden kann als ein System sehr vieler radiärer Segmente von der Breite einer einzigen Linsenfaser.*) In den einzelnen Lamellen verlaufen aber die Fasern im Allgemeinen so, dass sie von der Mitte der Linsenfläche nach den Rändern ausstrahlen und sich dann nach der Mitte der anderen, vorderen oder hinteren, Fläche umbiegen, ohne dass jedoch eine Faser wirklich von dem Mittelpunkte der einen Fläche zu dem der anderen gelangt; vielmehr enden die Fasern hier, in den Mitten beider Flächen, an einer sternförmigen Figur. Der Inhalt dieser Linsensterne besteht nicht aus Röhren, sondern erscheint theils feinkör-

*) s. Kölliker: Mikrosk. Anat. II. Bd. 2. Hälfte. S. 704 f.

nig, theils homogen, daher in jeder Linsenhälfte, insofern die Sterne durch alle Schichten hindurchgehen, eine gewisse Anzahl senkrech-

Fig. 112.



ter, nicht faseriger Lamellen vorkommt. Obenstehende Abbildung zeigt nach Arnold die Faserung, insbesondere die Sterne der Linse: 1. die vordere, 2. die hintere Seite.

Durch das schon erwähnte Häutchen (Linsenkapsel), welches die Krystalllinse umschliesst, wird dieselbe an die umgebenden Theile des Augapfels befestigt, indem die membrana limitans (§. 136, S. 220), welche die ganze innere Fläche der Retina überzieht und sich auf den corpus ciliare und die processus ciliares forterstreckt, sich an den Rand der Linsenkapsel ansetzt.

141. Der Glaskörper (corpus vitreum) füllt den grösseren hinteren Theil der Augenhöhle zwischen der Linse und Retina (Fig. 111). Derselbe ist von einer sehr zarten und durchsichtigen Haut, der Glashaut (membrana hyaloidea), umschlossen, die sich vorn in zwei Blätter theilt: das eine, vordere, geht verschmelzend mit der membrana limitans als feines Häutchen im Verein mit den Strahlenfortsätzen (als zonula Zinnii, z Fig. 111) zur Krystalllinse und fügt sich in deren Kapsel ein, während das andere mit dem hinteren Theil der Linsenkapsel in Verbindung tritt. Der im Querschnitt dreieckig gestaltete Raum zwischen beiden Lamellen und dem Rande der Linse ist bekannt unter dem Namen des canalis Petiti.

Hinsichtlich auf die Structur des Glaskörpers lauten die Ansichten verschieden. Manche bezeichnen dieselbe als strahlig-fase-

rig oder membranös-zellig. Als Hannover*) den Glaskörper mit Chromsäure behandelte, fand er eine Menge Scheidewände, die von der Oberfläche aus gegen die Axe des Glaskörpers verliefen. Doch ist es fraglich, ob dergleichen im frischen Auge wirklich existiren. Kölliker**) betrachtet, in ziemlicher Uebereinstimmung mit Virchow, den Glaskörper als einen mehr oder minder consistenten Schleim, der wohl anfänglich eine Art Structur, vergleichbar dem embryonalen Zellengewebe, besitzt, von der jedoch späterhin jede Spur verloren geht.

142. Die Dimensionen des Auges und seiner verschiedenen Theile, insbesondere seiner optischen Medien sind wohl zuerst von Krause einer genaueren Messung unterworfen***). Derselbe nahm frische Augen von Menschen, die eines gewaltsamen Todes gestorben waren, durchschnitt sie in Wasser, dem etwas Eiweiss beigemischt war, und brachte sie dann unter ein aplanatisches Mikroskop von 5,5 Linien Sehfeld und 12maliger Vergrösserung, um die Dimensionen unter Anwendung mikrometrischer Vorrichtungen zu ermitteln. Es wurden 8 verschiedene Augen untersucht und unter anderen nachstehende numerische Werthe in Pariser Linien gefunden. Im Ocular des Mikroskopes war ein Glasmikrometer angebracht, dessen Linien als Ordinaten zur Bestimmung der Curven dienten; und aus den gemessenen Abscissen und Ordinaten wurden die Radien, Axen und Parameter der gekrümmten Flächen nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet.

Augapfel.

Nr.	Axe des Auges (Tiefe der Augenkammer)		Durchmesser		
			transversaler.	senkrechter	
	äussere.	innere.		äusserer.	innerer.
1.	10,9	9,85	10,9	10,8	9,9
2.	11,05	10,0		10,3	9,4
3.	10,7	9,8	10,7	10,5	9,6
4.	10,5	9,5	10,6	10,3	9,5

*) Müller's Archiv 1845. St. 467; — vgl. Brücke, ebenda 1843. S. 345 u. 1845. S. 130, sowie desselben anatomische Beschreibung des menschlichen Augapfels, Berlin 1847. S. 65.

**) a. a. O. 715 f.

***) Poggend. Ann. Bd. XXXIX. S. 527; s. auch Bd. XXXI. S. 93.



Nr.	Axe des Auges (Tiefe der Augenkammer).		Durchmesser		
			transversaler.	senkrechter	
	äussere.	innere.		äusserer.	innerer.
5.	10,8	9,55	10,9	10,55	9,6
6.	10,8	9,55	11,0	10,6	9,45
7.	10,65	9,4	10,75	10,3	9,45
8.	10,65	9,45	10,75	10,3	9,15

Hornhaut.

Nr.	Dicke		Vorderfläche.		Hinterfläche.
	in der Mitte.	am Rande.	Transversale Sehne.	Krümmungs-Halbmesser.	Parameter ihrer parabol. Krümmung.
1.	0,4	0,5	4,6	4,38	6,14
2.	0,35	0,5	5,3	4,12	5,55
3.	0,4	0,5	5,0	3,67	5,28
4.	0,4	0,45	5,2	3,91	6,22
5.	0,5	0,55	5,0	3,84	6,18
6.	0,48	0,55	5,0	3,78	5,59
7.	0,53	0,63	4,7	3,86	5,54
8.	0,5	0,62	4,6	3,72	4,31

Nr.	Blendung (Iris).			
	Breite der		Pupille	
	inneren Häfte.	äusseren Hälfte.	Durchmesser.	Entfernung von der Hornhaut.
1.	1,7	1,9	1,8	1,0
2.	1,5	1,75	2,25	1,15
3.	1,1	1,4	2,6	1,25
4.				
5.	1,7	1,9	1,4	1,1
6.				1,1
7.	1,6	1,8	1,5	0,9
8.	1,8	2,0	1,2	0,9

Linse.

Nr.	Querdurchmesser.	Axe.	Ellipsoidische Vorderfläche.			Parabol. Hinterfläche.	
			Halbe grosse Axe.	Halbe kleine Axe.	Entfernung von der Hornhaut.	Parameter.	Entfernung von der Retina.
1.	4,1	2	2,05	0,95	1,2	4,49	6,65
2.	4	1,9	2	0,91	1,35	4,99	6,8
3.	4,1	2,4	2	1,14	1,25	4,99	6,1
4.	4,1	2,2	2,05	1,10	1,35	4,51	5,9
5.	4	1,85	2,03	0,83	1,25	4,83	6,1
6.	4,1	2,35	1,95	0,98	1,2	4,53	6,0
7.	4	1,8	2,03	0,95	1	4,09	6,65
8.	4	1,85	2	0,94	1	3,79	6,55

Hintere Wölbung.

Nr.	Axe des Ellipsoids der hinteren Wölbung der Retina.		Nr.	Axe des Ellipsoids der hinteren Wölbung der Retina.	
	Halbe grosse.	Halbe kleine.		Halbe grosse.	Halbe kleine.
1.	5,12	4,15	5.	5,14	4,58
2.	5,05	4,15	6.	5,05	4,43
3.	5,12	4,23	7.	5,05	4,41
4.	5,07	4,41	8.	4,93	4,19

Mittelzahlen aus den gefundenen Dimensionen zu ziehen hielt Krause nicht für statthaft. Jedes Auge hat, wie sich schon aus den mitgetheilten Werthen ergiebt, in allen seinen Theilen seine eigenen Dimensionen und Krümmungen, die von denen anderer Augen oft beträchtlich abweichen, und hierin liegt es auch zum Theil, dass das eine Auge vor dem anderen gewisse Vorzüge und zugleich gewisse Mängel besitzen kann. Bei einigen Augen findet sich in den Krümmungen der Hornhaut und Linse eine ziemliche Uebereinstimmung, bei anderen scheint aber die stärkere Krümmung der einen Fläche durch eine schwächere Krümmung einer anderen Fläche ausgeglichen zu werden.

143. Weder die beiden Flächen der Krystalllinse, noch die Hornhaut sind genau sphärisch gestaltet, obgleich man, um zunächst für die dioptrischen Verhältnisse des Auges eine bequeme Grundlage zu gewinnen, diejenigen Theile dieser brechenden Flä-

chen, welche bei der Darstellung der Bilder auf der Netzhaut vorzugsweise in Betracht kommen, nämlich die Scheiteltheile derselben als sphärisch annehmen kann. Nach Krause ist die vordere Hornhautfläche nahezu sphärisch, die hintere aber parabolisch gekrümmt. Die Parameter der hinteren parabolischen Krümmung sind in der obigen Tabelle (unter Hornhaut) für verschiedene Augen gegeben. Auch für die hintere Fläche der Linse fand Krause eine parabolische Krümmung, während die vordere Fläche eine ellipsoidische Krümmung kundgab, deren grosse und kleine Axe für die untersuchten Augen oben angeführt sind. — Krause machte seine Beobachtungen, wie oben hervorgehoben, an todten Augen, die ungefähr 18 bis 48 Stunden nach dem Tode zur Verwendung kamen, was inzwischen wohl immerhin gewisse Veränderungen des Auges mit sich führte, durch welche die Genauigkeit der erhaltenen Resultate zum Theil alterirt wurde. Messungen von Helmholtz lassen es kaum bezweifeln, dass die Axe (Dicke) der Linse im lebenden Auge wahrscheinlich stets kleiner als im todten ist, und dies dürfte, wie derselbe meint, seinen Grund in einer Abspannung der zonula Zinnii nach dem Tode haben. In drei von ihm untersuchten Augen fand Helmholtz für die Linsenaxe die Werthe: 3,413, 3,801 und 3,555 Millimeter, wogegen diese Axe in den von Krause untersuchten 8 todten Augen zwischen circ. 4 und 7 Millimeter variirt. Auch die Hornhaut erfährt nach dem Tode nicht zu verkennende Formänderungen.

Messungen an lebenden Augen zur Bestimmung der Linsenaxe, des Abstandes der Hornhaut von der Linse, sowie der Krümmungen der Hornhaut und Linse lassen sich mittelst der Spiegelbilder vornehmen, welche die vordere Hornhautfläche, die vordere und hintere Linsenfläche unter Umständen darbieten. Die vordere Hornhaut- und Linsenfläche stellen nämlich kleine Convexspiegel vor, während die hintere Linsenfläche einen kleinen Concavspiegel bildet (1. Abth. §. 10 ff.). Befindet sich nun seitlich von der Axe eines Auges eine Kerzenflamme dergestalt, dass ihre Lichtstrahlen in dieses Auge fallen können; so kann man, wenn man von der anderen Seite her in dasselbe Auge hineinsieht, drei Spiegelbilder wahrnehmen, nämlich 1) ein helles, aufrechtes Spiegelbild durch Reflexion der Lichtstrahlen von Seiten der Hornhaut, 2) ein sehr mattes, aber gleichfalls aufrechtes Bild von der vorderen Linsenfläche, und 3) ein kleines, verkehrtes Spiegelbild von der hinteren

Linsenfläche, deren concave Seite dem Beobachter zugewendet ist. Mit einer Bewegung der Kerzenflamme ist natürlich auch eine Verrückung dieser Spiegelbilder verbunden, und zwar in der Art, dass sich das Spiegelbild 3) mit der Flamme nach derselben Seite hin bewegt, während sich die beiden anderen im entgegengesetzten Sinne verschieben.

144. Senff suchte die vordere Hornhautkrümmung am lebenden Auge in folgender Weise zu bestimmen*). Die zur Untersuchung bestimmte Person musste sich einem Fenster gegenübersetzen, auf dessen einer Scheibe zwei Streifchen schwarzes Papier befestigt waren. Sodann wurde die Distanz der letzteren im Spiegelbildchen der Hornhaut mittelst eines Fernrohrs (Kometensuchers) beobachtet und bei verschiedenen Stellungen des Auges mikrometrisch gemessen. Die Messung geschah für jedes Auge an 7 Punkten, deren Winkelabstand von der optischen Axe —25°, —20°, —10°, 0°, 10°, 20°, 25° betrug, und die Berechnung führte zu einer elliptischen Gestalt der Hornhaut, wie folgende Tabelle zeigt.

	Halbe Axe der Ellipse.	Krümmungshalbmesser im Scheitel.	Abweichung des Scheitels der Ellipse vom Endpunkte der Augenaxe in Winkelgraden.
Rechtes Auge in vertikaler Richtung.	4,190 u. 3,805	3,455	3°,6 nach unten.
Rechtes Auge in horizontaler Richtung.	4,626 u. 3,998	3,456	2°,9 nach aussen.
Linkes Auge in vertikaler Richtung.	3,984 u. 3,699	3,434	1°,6 nach unten.

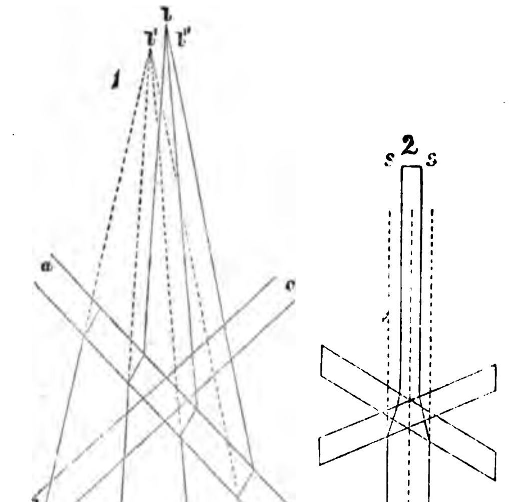
Nach Messungen von Helmholtz entspricht die vordere Hornhautfläche einem Ellipsoid, das aus der Umdrehung der Ellipse um ihre grosse Axe hervorgegangen ist, und dessen Scheitel in der Mitte der Hornhaut liegt. Bemerkenswerth ist auch, dass die vordere und hintere Hornhautfläche am Scheitel concentrisch verlaufen.

145. Um die oben hervorgehobenen Spiegelbilder zur Bestimmung der in Rede stehenden Grössen genauer zu verwerthen,

*) R. Wagner's Handwört. der Physiologie, Art. Sehen v. Volkmann. Bd. 3, 1. Abth. S. 270.

benutzte Helmholtz eine dem Heliometer in der Astronomie ähnliche Vorrichtung unter dem Namen eines Ophthalmometers, das im Wesentlichen auf folgendem Princip beruht. Wenn ein leuchtender Punkt *l* ein System von Lichtstrahlen auf eine von parallelen Ebenen begrenzte Glasplatte *ab* wirft, so geschieht in derselben die Brechung auf bekannte Weise (I. Abth. §. 16), so nämlich, dass die Strahlen parallel zu ihrer früheren Richtung aus der Platte hervortreten. Und demgemäss scheinen sie vom Punkte *l'*

Fig. 113.



zu kommen, der seitlich von dem gegebenen *l* liegt, und um so mehr von diesem verschoben erscheint, je schiefer die Strahlen von *l* auf die Platte fallen, oder je grösser der Winkel zwischen diesen Strahlen und ihren auf die Platte gezogenen Einfallslothen ist. Sodann ist diese Verschiebung des Bildes noch abhängig von der Dicke der Glasplatte und dem Brechungsverhältnisse der letzteren. — In der zu *ab* symmetrischen Stellung *cd* wird die Platte in ganz ähnlicher Weise eine Verschiebung des Bildes von *l* zur Folge haben, nur nach der anderen Seite hin, so als ob die Strahlen von dem Punkte *l''* kämen. Nun sind hinsichtlich auf das Ophthalmometer zwei gleich dicke Glasplatten übereinander gelegt

und um eine vertikale Axe im entgegengesetzten Sinne drehbar so vor dem Objectiv eines Fernrohres angebracht, dass die obere Platte vor der oberen, die untere vor der unteren Hälfte des Objectivs sich befindet. Beide Platten lassen sich aber so drehen, dass die Axe des Fernrohres, die durch die Kreuzungsstelle derselben geht, stets den Winkel zwischen ihnen halbirt. Der leuchtende Punkt erscheint nun, durch das Fernrohr betrachtet, doppelt, indem man die beiden Bilder *l*, *l'* wahrnimmt, und nur in dem einen Falle einfach, wo beide Platten zusammenfallen und nur ein brechendes System ausmachen.

Wäre nun das leuchtende Object *ss* (Fig. 113. N. 2) eines jener Spiegelbilder, so würde dasselbe, durch eine planparallele Glasplatte betrachtet, dem Auge bei *o* nur verschoben erscheinen, während man bei gleichzeitiger Anwendung zweier solcher Platten in der bezeichneten Weise zwei Bilder sehen würde. Diese Bilder lassen sich durch Drehung der Platten mit ihren einander zugewandten Rändern in Berührung bringen, wo sich dann aus dem Winkel, um welchen man die Platten drehen muss, damit diese Berührung geschieht, auch die Grösse des gegebenen Bildes finden lässt; denn diese entspricht im Falle der Berührung beider Bilder der Grösse der Verschiebung, welche dieselben durch beide Platten erfahren. — Als Object für die Spiegelung benutzte Helmholtz zwei nebeneinander gestellte leuchtende Punkte, die mittelst zweier Löcher in einem undurchsichtigen Schirme, der sich vor einer Lampenflamme befand, leicht herzustellen waren.

Hat man nach dieser Methode, hinsichtlich auf deren weitere Entwickelung und Anwendung bei Helmholtz*) nachgesehen werden kann, die Grösse des Spiegelbildes von Seiten der Hornhaut bestimmt, so findet man durch eine einfache Rechnung leicht den Krümmungshalbmesser ihrer vorderen Fläche; denn es gilt hier, wo wir es mit einem Convexspiegel zu thun haben, die Proportion: $p : p' = e : \frac{1}{2}r$, worin p die Grösse des gespiegelten Objects, p' die des Spiegelbildes, e den Abstand des Objects von der spiegelnden Oberfläche und r den gesuchten Krümmungshalbmesser bedeutet, so dass mithin $r = \frac{2 . e . p'}{p}$ ist.

Complicirter macht sich, wegen der wiederholten Brechung

*) Physiolog. Optik. Leipz. 1852.

der Lichtstrahlen, die Bestimmung der Krümmungshalbmesser der vorderen und hinteren Linsenfläche.*)

146. In Hinsicht auf die Brechung der Lichtstrahlen zeigen die wässerige Feuchtigkeit und der Glaskörper nur geringe Unterschiede, und auch das Brechungsverhältniss der Hornhaut ist von dem der beiden genannten Flüssigkeiten nur wenig verschieden. Besondere Eigenthümlichkeiten bietet dagegen die Krystalllinse dar, deren Schichten von der Oberfläche nach dem Kern hin an Dichte zunehmen; daher die innern Schichten stärker brechen als die äusseren, und zwar, wie es wahrscheinlich ist, nicht allein wegen ihrer grösseren Dichte, sondern auch wegen ihrer grösseren Convexität, woraus denn schon Senff folgerte, dass das Brechungsvermögen der geschichteten Linse grösser ist, als wenn sie durchweg aus einem Stoffe von der Dichte des Kerns bestände. Und neuerdings zeigte auch Helmholtz, dass das Brechungsvermögen der Linse grösser, und also ihre Brennweite kleiner ist, als wenn ihre ganze Substanz das Brechungsvermögen des Kerns hätte. An zwei Augen, die 12 Stunden nach dem Tode untersucht wurden, fand Helmholtz für die Brennweite der Linsen 45,144 und 47,435 Millimeter, und die Linsenaxen = 4,20 und 4,314^{mm}.

Numerische Werthe für die Brechungsquotienten (oder Brechungsindices) der optischen Medien des Auges liegen unter anderen namentlich von Brewster, Papenheim, Helmholtz und neuerdings von Krause (dem Jüngeren) vor.

Brewster bestimmte den Brechungsindex der Hornhaut zu 1,3366, während der des Wassers = 1,3358 ist. Krause fand für die Hornhautsubstanz den Brechungsindex = 1,3507.

Die Brechungsindices der übrigen optischen Augenmedien sind nach Brewster:

Wässerige Feuchtigkeit	1,3366
Aeussere Schicht der Linse . .	1,3767
Mittlere Schicht der Linse . . .	1,3786
Kern der Linse	1,3990
Glaskörper	1,3394

*) S. weiterhin im 2. Capitel dieser Abth. bei Gelegenheit der Accommodation des Auges.

Papenheim*) fand den Brechungsindex für die vordere Schicht des Glaskörpers = 1,3339 und 1,3343, für die hintere = 1,3371.

Nach Helmholtz sind die Brechungsexponenten der verschiedenen Augenmedien, wenn der des Wassers zu 1,3354 angenommen wird, folgende:

Wässerige Feuchtigkeit	1,3365
Aeussere Schicht der Linse . .	1,4189
Totaler Brechungsindex der Linse	1,4519
Derselbe für ein anderes Auge .	1,4414
Glasfeuchtigkeit	1,3382

Und endlich erhielt Krause im Mittel aus 20 Versuchen, den Brechungsindex des Wassers = 1,3342 angenommen, nachstehende Werthe:

Hornhaut	1,3507
Wässerige Feuchtigkeit	1,3420
Aeussere Linsenschicht	1,4053
Mittlere Linsenschicht	1,4294
Linsenkern	1,4541
Glaskörper	1,3485

Manches Andere, was die optischen Medien des Auges betrifft, so unter anderem die Formveränderungen der Linse beim Sehen in verschiedene Entfernungen, wird im nächsten Kapitel gelegentlich seine Stelle finden.

III. Nerven und bewegende Muskeln des Auges.

147. Der Sehnerv (nervus opticus), der beim Sehen von der Retina aus in Activität tritt, ist bereits (§. 136) hinsichtlich auf seine Ausbreitung im Innern des Auges näher besprochen. Die Sehnerven beider Augen treten nun auf ihrem Wege aus dem Gehirn, bevor sie in den Augapfel dringen, an der sog. Kreuzungsstelle (chiasma nervorum opticorum, *c* Fig. 114), zusammen. Und hier geht von den Fasern eines jeden Nervenstammes ein Theil nach dem entsprechenden Auge, ein anderer Theil aber in den Stamm des anderen Auges, und zwar so, dass in jedem Stamme die äusseren Fasern zu dem auf ihrer Seite gelegenen Auge, die inneren dagegen in den anderen Stamm treten.

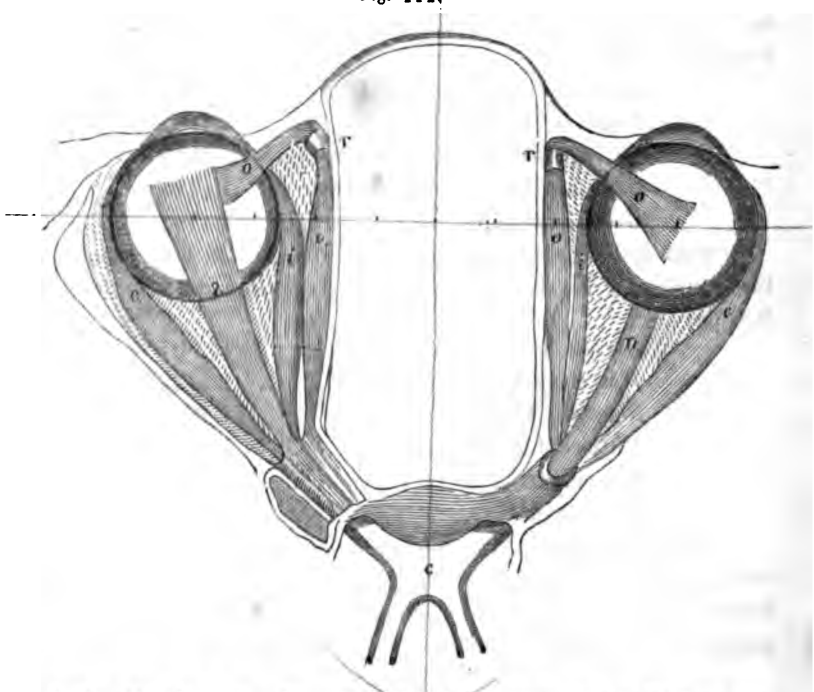
Während aber die Affection des Sehnerven nur Lichtempfin-

*) Comptes rendus de séanc. de l'acad. de scienc. T. XXV. p. 901.

dungen zur Folge hat, werden die Schmerz- und Tastempfindungen des Auges durch gewisse Gefühlsnerven (sensorische Nerven) ver-



Fig. 114.



mittelt, die als Aeste des nerv. trigeminus vom fünften Hirnnervenpaar kommen und sich in die Hüllen des Auges einsenken. Dagegen entspringen die Bewegungsnerven (motorische Nerven) des Auges, nämlich seiner äusseren Muskeln und der Regenbogenhaut, theils, als nervus oculomotorius, aus dem dritten Hirnnervenpaar, theils aus dem oberen Rückenmark, als Zweige des nervus sympathicus.

148. Das Auge besitzt sechs bewegende Muskeln, die ihm seine grosse Beweglichkeit nach verschiedenen Richtungen verleihen; sie alle sind einerseits an der knöchernen Wandung der Augenhöhle und andererseits mit ihren Sehnen dem Umfange des Augapfels angeheftet. Vier dieser Muskeln, die sog. **geraden** (musculi recti) sitzen an vier einander gegenüber befindlichen Stellen des Augapfels, und zwar zu beiden Seiten (nach rechts und links) der innere und äussere gerade (musculus rectus internus et

externus), oben und unten der obere und untere gerade (musculus rectus superior et inferior). Die beiden anderen Muskeln sind der obere und untere schiefe (musculus obliquus superior et inferior), welche von der inneren, der Nase zugewandten, Seite der Augenhöhle herkommen; die Sehne des oberen schiefen Muskels geht an dem innern oberen Winkel der Augenhöhle durch eine Art Rolle, d. h. durch einen kleinen fibrösen Hohlcylinder (*r*, Fig. 114), und wendet sich dann nach aussen und unten, um sich unterhalb des oberen geraden Muskels an den grössten Umfang des Augapfels anzusetzen.

In Fig. 114, welche die beiden Augäpfel von oben zeigt, ist *s* (links) der musc. rect. superior, der rechts weggelassen ist; *i* bezeichnet den musc. rect. internus, *e* den musc. rect. externus, *o* den musc. obliquus superior, und endlich *n* den Sehnerven des rechten Auges.

Die Thätigkeit (Contraction) dieser Muskeln ist, mit Ausnahme des musc. rect. externus und musc. obliq. superior, bedingt durch den aus dem Gehirn stammenden nervus oculomotorius, unter dessen Einfluss auch noch die circularen Muskelfasern der Iris (sphincter pupillae) stehen, während die radiären Muskelfasern der Iris (dilitator pupillae, §. 132) durch die vom nerv. sympathicus kommenden Fasern versorgt werden. Besondere Nerven erhalten aber der musc. rectus externus und der musc. obliquus superior, und zwar jener in dem nerv. abducens, dieser in dem nerv. trochlearis.

Die genannten bewegenden Muskeln des Auges sind alle dem Willen unterworfen, wogegen die Bewegungen der Iris fast nur unwillkürlich geschehen; so geschieht die Verengerung der Pupille meist auf reflectorischem Wege, indem die Reizzustände des Sehnerven, wenn die Retina durch starkes Licht afficirt wird, im Centralorgan jene motorischen Nerven anregen, die dann durch ihre Thätigkeit die betreffenden Muskelfasern der Iris zur Contraction veranlassen. — An einem anderen Orte werden wir nochmals auf die Bewegungen der Iris zurückkommen.

IV. Drehbewegungen des Auges.

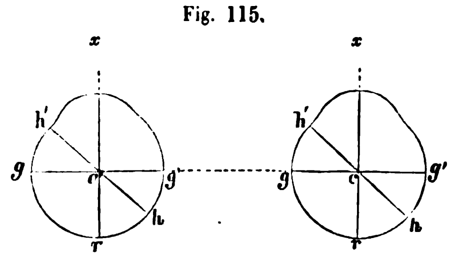
149. Die Bewegungen des Auges, welche durch die Thätigkeit seiner äusseren Muskeln erzielt werden, sind drehende um dauernde Axen, so dass während der ganzen Dauer einer Drehung



eine und dieselbe Axe ihre Lage im Raume behauptet. Um bezüglich dieser Drehungen eine bestimmte Anschauung zu gewinnen, denkt man sich durch den Mittelpunkt des Augapfels zwei rechtwinklige Coordinatensysteme gezogen, von denen das eine unveränderlich feststeht, während das andere mit dem Auge beweglich ist. Für eine bestimmte Stellung des Auges, die man die primäre nennen kann, fallen beide Systeme zusammen; bewegt sich aber das Auge aus dieser Stellung heraus, so werden die Axen des beweglichen Coordinatensystems mit denen des festen am Drehungsmittelpunkte bestimmte Winkel einschliessen, aus welchen die Grösse der vollzogenen Drehung bestimmbar ist; und zwar wird die neue Lage des Augapfels vollständig bestimmt sein, wenn die Lage zweier beweglichen Axen zu den festen gegeben ist.

Von den drei Axen der beiden Coordinatensysteme liegt die eine in der Richtung der Verbindungslinie *cc'* beider Augenmit-

Fig. 115.



telpunkte, die andere in der Richtung der Sehaxe *rx*, und die dritte *hh'* in einer Richtung, welche senkrecht auf der durch die Grundlinie *gg'* und Sehaxe *rx* bestimmten Ebene steht. Als Primärstellung, worin beide Coordinatensysteme zusammenfallen, bezeichnen wir mit Meissner diejenige, bei welcher die Sehaxen geradeaus gerichtet, zueinander parallel und 45° unter dem Horizont geneigt sind. Aus dieser Primärstellung kann das Auge nach zwei aufeinander senkrechten Hauptrichtungen bewegt werden; dasselbe kann sich nämlich drehen um die horizontale Queraxe *gg'* oder um die Höhenaxe *hh'*. Die neuen Lagen, die das Auge durch solche Bewegungen gewinnt, nennt Meissner S e c u n d ä r s t e l l u n g e n, deren es also zwei Arten gibt; die eine bezieht sich auf reine Neigungen des Auges bei parallel gerichteten Sehaxen, die zweite auf reine Convergenzen beider Augen gegeneinander. So werden alle Neigungen des Auges (nach oben und unten) bei parallelen Sehaxen durch Drehungen um die Queraxe *gg'*, dagegen alle

Convergenzen beider Augen, wenn die Sehaxe 45° unter den Horizont geneigt ist, durch Drehungen um die Höhenaxe *hh* vollzogen. Hiernach lässt sich nun eine aus beiden Secundärstellungen combinirte Stellung, also Neigung verbunden mit Convergenz, eine Tertiärstellung nennen, die durch Drehung des Auges um irgend eine andere Axe, die in der durch Quer- und Höhenaxe bestimmten Ebene liegt, gewonnen werden kann. In allen Secundärstellungen sind die grössten Kreise, in welchen sich die Retina und die durch die Höhen- und Sehaxe gelegte Ebene schneiden, für beide Netzhäute einander parallel. Man nennt diese grössten Kreise, durch welche jede Netzhaut in zwei Hälften zerfällt, die vertikalen Trennungslinien, die also für alle Secundärstellungen zueinander parallel sind.*) Anders verhält es sich mit den Tertiärstellungen. Denkt man sich bei denselben eine auf der Sehaxe absolut senkrecht stehende Linie auf die Netzhaut projicirt; so fällt diese Linie nicht, wie bei den Secundärstellungen, mit der vertikalen Trennungslinie zusammen, sondern schliesst mit der letzteren am Mittelpunkte der Retina einen Winkel ein.

Um die Sehaxe selbst findet, streng genommen, keine Drehung des Auges statt**). Die Existenz von drei Muskelpaaren bedingt aber Drehungen des Auges um drei Hauptaxen. So drehen der äussere und innere gerade Muskel das Auge um die vertikale Höhenaxe, der obere und untere gerade Muskel dasselbe um die horizontale Queraxe, wogegen die beiden musculi obliqui das Auge um eine Axe drehen, die annäherungsweise von der Eintrittsstelle des Sehnerven durch die Mitte des Auges zu dem äussersten Punkte der Iris geht***), und die Sehaxe unter einem ziemlich spitzen Winkel von etwa 36° schneidet†). — Ein bedeutendes

*) Vgl. das 3. Cap. dies. Abth. bezüglich des Horopters.

**) Vgl. Meissner: Beiträge zur Physiologie des Sehorgans, Leipzig 1854 S. 86 ff.

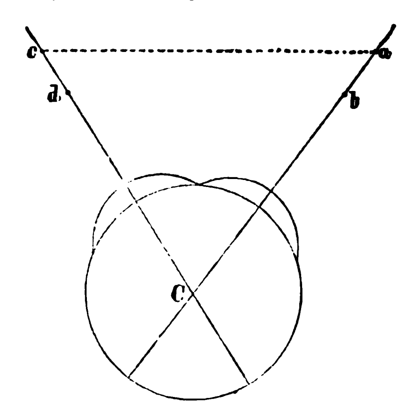
***) s. R. Wagner's Handw. d. Phys., Bd. III. Abth. 1. S. 273.

†) Hinsichtlich auf die drehenden Wirkungen der Augenmuskeln s. Weiteres bei Ruete: Lehrbuch der Ophthalmologie, Göttingen 1845; G. Meissner: die Bewegungen des Auges, Berl. 1856; A. Fick: Henle's und Pfeuffer's Zeitsch. N. F. Bd. IV. S. 101., Bd. V. S. 131; Donders: Beitrag zur Lehre von den Bewegungen des menschl. Auges im Archiv für die Holländ. Beiträge I. S. 105; Gräfe: Archiv für Ophthalmologie Bd. I. S. 1; Ludwig: Lehrbuch der Physiologie, Bd. I. S. 226 ff.; B. Gudden: quaestiones de motu oculi humani. Diss. inaug. Halae. 1848.

Zurückweichen des Bulbus nach hinten wird durch den elastischen Widerstand des Fettpolsters verhütet, welches den ganzen Raum der Augenhöhle hinter dem Bulbus ausfüllt; und hierdurch kann, insofern die vier musc. recti ausser ihrer den Bulbus drehenden Componente noch eine nach hinten ziehende Componente besitzen, die letztere aufgehoben werden.

150. Fixirt man einen leuchtenden Punkt, so fällt das Bild desselben auf den Mittelpunkt der Retina, dahin, wo die Sehaxe dieselbe schneidet. Und auf diese Stelle fallen die Bilder aller leuchtenden Punkte, die innerhalb der verlängerten Sehaxe gelegen sind. Hierdurch ist ein Mittel gegeben, die Richtung der verlängerten Sehaxe bei irgend einer Stellung des Auges und weiterhin auch die Lage des Drehpunktes im Auge zu bestimmen. Man stellt in einer gewissen Entfernung vom Auge ein leuchtendes Object *a*, etwa eine Nadel, auf, um deren Spitze zu fixiren, und bringt

Fig. 116.



dann einen zweiten Punkt *b* so zwischen das Auge und den Punkt *a*, dass dieser vollständig gedeckt wird. Hierauf dreht man bei unverrücktem Kopfe das Auge nach der Seite, um mit zwei anderen Punkten *c* und *d* das Experiment in derselben Weise zu wiederholen. Die sich deckenden Punkte *c* und *d* liegen nun, wie vorher *a* und *b*, in der verlängerten Sehaxe, deren Lage beidemal durch diese Punkte: hier durch *c* und *d*, dort durch *a* und *b* bestimmt ist. Der Punkt *C* aber, worin sich die Sehaxen hinsichtlich auf die beiden in Betracht gezogenen Stellungen des Auges schneiden, wird des letzteren Drehpunkt sein, dessen Entfernung von

der Cornea sofort bestimmbar ist, wenn man den Abstand des Punktes *b* oder *d* vom Scheitel der Cornea gemessen hat.

Auf solche Weise suchte Volkmann *), wie auch Valentin **) und Burow den Drehpunkt des Auges zu bestimmen. Die Messungen führten zu dem Resultat, dass der Drehpunkt etwa 11 bis 14,1 Millimeter oder ungefähr 5''',6 vom Corneascheitel entfernt ist, woraus sich entnehmen lässt, dass er nahezu, wenn nicht ganz, in der Mitte der Augenaxe liegt, deren Länge etwas grösser als 10''' ist (s. die Tabelle S. 229 f.).

151. Noch ist zu bemerken, dass im normalen Zustande die bewegenden Muskeln beider Augen dergestalt zusammenwirken, dass sie beiden Augen eine gewisse gleichsinnige Bewegung mitzutheilen streben; daher, wenn das eine Auge nach oben oder unten geneigt ist, auch gleichzeitig das andere Auge dieselbe Stellung durch Drehung um die horizontale Queraxe annimmt, wie denn auch beide Augen zugleich durch Drehung um die Höhenaxe sich so stellen können, dass ihre verlängerten Sehaxen in irgend einem Winkel nach vorn convergiren und sich in dem gerade fixirten Punkte eines Objects durchschneiden; und nur dann, wenn durch fehlerhafte Angewöhnung oder Krankheit diese Gleichsinnigkeit in der Wirkung der beiderseitigen Augenmuskeln gestört ist, nimmt das eine Auge eine Stellung an, die der des anderen in Bezug auf das zu sehende Object nicht entspricht, wie dies beim Schielen der Fall ist. Gewiss ist die im normalen Zustande vorhandene Gleichsinnigkeit in den Bewegungen beider Augen, wie wir später erkennen werden, von Bedeutung für den Umstand, dass wir mit beiden Augen einen Gegenstand einfach sehen können; zwingt man eines von beiden Augen durch Druck mit dem Finger oder sonstwie in eine andere Richtung, so sieht man den Gegenstand, auf den man vorher die Augen gerichtet hatte, doppelt. Und das Schielen besteht, wie es scheint, eben nur darin, dass beide Augen die ihnen im normalen Zustande eigenthümlichen übereinstimmenden Bewegungen, etwa in Folge einer Muskellähmung, mehr oder weniger eingebüsst haben, so dass es denselben schwer fällt oder gar unmöglich ist, ihre Axen zugleich auf denselben Gegenstand zu richten und sie hier zum Durchschneiden zu bringen. Es wird dann

*) Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes, Leipz. 1836, S. 33.

**) Lehrbuch der Physiologie, Bd. II. S. 334.

wohl nur mit einem Auge gesehen, d. h. den Eindrücken desselben vorzugsweise oder ganz die Aufmerksamkeit zugewandt, während das andere minder oder gar nicht thätige in abweichender Richtung gehalten wird. In dieser Weise verhält es sich beim sog. einseitigen Schielen, das zunächst durch die Krankheit eines oder mehrerer Muskeln veranlasst ist; hier hat man wirklich gefunden*), dass das schielende Auge im Vergleich zum anderen immer sowohl in Hinsicht auf seine Sehkraft (Empfindlichkeit der Retina) als auf sein Accommodationsvermögen geschwächt, in seltenen Fällen wohl auch ganz erblindet ist, während beim sog. wechselnden Schielen, wo der Kranke willkürlich bald mit dem einen, bald mit dem anderen Auge schielt, die Sehkraft beider Augen meist nur sehr wenig verschieden ist. So leicht es nun im normalen Zustande beiden Augen ist, ihre Axen unter einem beliebigen Winkel nach vorn convergiren zu lassen, so viel Schwierigkeit bietet sich für die meisten Augen, ihren Axen eine nach vorn divergirende Richtung beizubringen, ihnen also eine solche Richtung zu geben, dass sie nach einem hinter den Augen gelegenen Punkt convergiren. Geschehen kann es, wenn man mit einem Auge einen Punkt fixirt, während man das andere zu einer Bewegung nach aussen zwingt; und zwar ist, wie H. Meyer**) fand, die Divergenz der Sehaxen, wenn man mit dem linken Auge fixirt und das rechte nach aussen führt, etwas grösser als da, wo man das rechte Auge unverrückt hält und das linke nach aussen wendet. Nach demselben beträgt das Maximum der Divergenz ungefähr 11°.

V. Schutzorgane des Auges.

152. Zum Schutze gegen die Berührung fremder Körper, durch welche das Auge verletzt werden könnte, und wohl auch gegen das Eindringen allzustarken Lichtes, ist das Auge von aussen durch die Augenlider (palpebrae) bedeckt, die sich vermöge eines gemeinschaftlichen Kreismuskels (musc. orbicularis palpebrarum) und des nur dem oberen Lide angehörigen Aufhebemuskels (musc. levator palp.) rasch schliessen und wieder öffnen

*) Ruete in R. Wagners Handw. der Physiol. Bd. III. Abthl. 2. S. 299 f. Ueber verschiedenes Hierhergehörige s. auch Böhm, das Schielen. Berlin 1845.

**) Zur Lehre von der Synergie der Augenmuskeln in Poggend. Ann. Bd. LXXXV.

lassen. Jedes Augenlid, dem ein dünner, halbmondförmiger, biegsamer und merklich elastischer Knorpel (tarsus) als Stütze dient, ist auf der Innenseite mit einer Schleimhaut (conjunctiva), die sich seitlich auf die Wölbung des Augapfels fortsetzt, und aussen von der Gesichtshaut überzogen.

Die beiden genannten Muskeln werden durch verschiedene Nerven erregt, und zwar der musc. orbicularis, welcher das Schliessen der Augenlider bewirkt, durch den nervus oculomotorius (§. 147), und der musc. levator, der das obere Augenlid emporzieht, durch den nervus facialis. Indess kann das Schliessen der Augenlider oder eine Verengerung ihrer Spalte durch den musc. orbicularis auch noch auf reflectorischem Wege geschehen, sobald die Retina durch einen starken Lichteindruck afficirt wird. — Beim völligen Verschluss des Auges berühren die Ränder beider Augenlider einander vollständig bis auf eine kleine dreiseitige Rinne an der hinteren Kante, während auch sonst die Innenseite der Augenlider sich der Vorderfläche des Auges genau anschliesst.

Am Rande der Augenlider sitzen, gewissermassen als feine Tastwerkzeuge, die Augenwimpern, hinter welchen sich die Mündungen einer im Augenlidknorpel gelegenen Reihe von Talgdrüsen (Meibom'sche Drüsen) befinden, die eine ölige Substanz absondern, durch welche die Thränenflüssigkeit, falls sie nicht zu reichlich hervortritt, am Ueberlaufen über die Augenlidränder verhindert wird.

153. Von Bedeutung für die Erhaltung des Sehorgans sind in gewisser Beziehung auch die Thränen: eine wasserhelle, etwas salzige Flüssigkeit, deren Hauptquelle die am äussern Theile der Augenhöhldecke gelegene Thränendrüse: ein Aggregat grösserer und kleinerer traubiger Drüsen ist, die in zwei Gruppen, der sog. oberen und unteren Thränendrüse, angeordnet sind. Die 6—12 Ausführungsgänge derselben lassen die Thränenflüssigkeit unter dem oberen Augenlide hervortreten, von wo aus sie über die Vorderfläche des Auges verbreitet und nach dem inneren Augenwinkel zu in dem sog. Thränensee gesammelt wird, um von hier durch kleine Canälchen in den grösseren Thränengang und aus diesem in die Nasenhöhle abzufliessen.

Weil nun nirgends zwischen der Innenseite der Augenlider und der Oberfläche des Augapfels ein erheblicher Zwischenraum besteht, werden auch die unter dem oberen Augenlide hervorquel-

lenden Thränen nicht nach dem Gesetze der Schwere frei herabfliessen, sondern vermöge der Flächenanziehung haarröhrenartig und in Folge des Augenlidschlages überall und gleichmässig auf der Vorderfläche des Augapfels verbreitet werden. Ihr Abfluss am Augenlidrande wird aber unter gewöhnlichen Umständen durch das fettige Secret der Meibom'schen Drüsen verhindert (§. 152), während ihre weitere Fortleitung und Aufsaugung gar sehr durch Verengerung der Augenlidspalte, nämlich durch das Blinzeln des Auges begünstigt wird. *) Stellt man das Blinzeln absichtlich einige Minuten ein, so wird der Abfluss der Thränen nach der Nasenseite hin dergestalt gehemmt, dass sie die Wange herablaufen.

Durch die gleichmässige Verbreitung der Thränenflüssigkeit auf der Vorderfläche des Auges wird diese nun feucht erhalten, also vor dem Austrocknen durch Verdunstung geschützt, und auch beständig gereinigt, indem fremde Körperchen aller Art durch dieselbe fortgespült werden. So erhält sie die Hornhaut durchsichtig. Die beständige Abschuppung der Epithelialgebilde der Cornea und Schleimhaut (conjunctiva) würde bald, bemerkt Frerichs, die Oberfläche des Bulbus mit einem undurchsichtigen Ueberzuge bedecken, wenn nicht ein beständiger Strom wässeriger Flüssigkeit für ihre stete Entfernung sorgte, wobei der Alkaligehalt der Thränen durch die lösende Kraft, die er auf Hornhautsubstanzen ausübt, die Lostrennung der Epithelien fördern kann.

Zweites Kapitel.

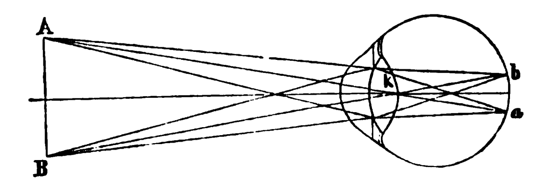
Die dioptrischen Verrichtungen des Auges.

154. Das Auge bietet ein System von optischen Medien dar, durch welches die von einem Objecte einfallenden Lichtstrahlen so gebrochen werden, dass sie in ähnlicher Weise wie nach ihrem Durchgange durch das Linsensystem einer Camera obscura

*) s. Frerichs in R. Wagner's Handw. der Physiol. Bd. III. Abthl 1. S. 627 ff.; — auch Schmid, über Absorption der Thränenflüssigkeit, Marburg 1856.

(§. 37, Abthl. 1) ein verkehrtes, verkleinertes Bild des Objects gewähren müssen. So werden, wenn *AB* ein leuchtender Gegenstand ist, der dem Auge Licht zusendet, die durch die Hornhaut und wässerige Feuchtigkeit gebrochenen und dann durch die Pu-

Fig. 117.



pille gehenden Strahlen in der Linse eine zweite Brechung erfahren und hiernach im Hintergrunde des Auges das verkehrte Bild *ab* geben.

Nun kann man aber, wenn man das Auge als ein concentrirtes System sphärisch gestalteter Medien betrachtet, den Gang der Lichtstrahlen in demselben mittelst der sog. optischen Cardinalpunkte nach der in Abthl. I., §. 38—40, erörterten Methode sofort näher bestimmen, wobei jedoch zu bemerken ist, dass diese Methode, streng genommen, nur für solche Strahlen gilt, die einen sehr kleinen Winkel mit der Axe des Systems machen und unter einem kleinen Einfallswinkel die brechenden Flächen treffen. Immerhin ist es aber, weil die Trennungsflächen der optischen Augenmedien nicht beträchtlich von der sphärischen Form abweichen, erlaubt, kleine Stücke dieser Flächen und insbesondere die um die Scheitelpunkte gelegenen als Kugelabschnitte zu behandeln. — In der Figur 118 S. 249 ist nun die optische Axe des Auges, welche die Krümmungsmittelpunkte aller brechenden Flächen desselben enthält, durch die Gerade FF' vorgestellt, die man sich insgemein von dem Scheitel der Hornhaut nach der Mitte des gelben Flecks gezogen denkt. In dieser Axe liegen die optischen Cardinalpunkte (§. 38 f.), nämlich der vordere und hintere Brennpunkt: F, F', der vordere und hintere Hauptpunkt: h, h' und endlich der vordere und hintere Knotenpunkt: k, k'.

155. Nimmt man in solcher Weise das Auge als ein centrirtes System sphärischer Medien, so kommt man mit Listing*)

*) in R. Wagner's Handw. d. Physiol. Bd. IV. S. 485.

zu dem Begriffe eines schematischen oder mittleren Auges, das für die Betrachtung der dioptrischen Verrichtungen des Auges in der That grosse Bequemlichkeit bietet und selbst für die Erkenntniss der Eigenthümlichkeiten des wirklichen Auges von Belang ist, insofern sich dieselben einfach als bestimmte Abweichungen vom schematischen Auge herausstellen. Soll jedoch die bezeichnete Methode zur Bestimmung des Ganges der Lichtstrahlen im Auge ihre volle Anwendung finden, so ist noch erforderlich, für die optischen Constanten des Auges bestimmte numerische Werthe einzuführen. Indessen weichen die Werthe dieser Constanten, die man aus zahlreichen Messungen an wirklichen für normal geltenden Augen gewonnen hat, in der Art voneinander ab, dass man es nicht für statthaft hielt, aus denselben Mittelzahlen zu bilden (S. 231); vielmehr erschien es nach Listing am zweckmässigsten, die optischen Constanten des schematischen Auges in möglichst einfachen und abgerundeten Zahlen auszudrücken, dergestalt, dass dieselben nicht eben sehr von jenen durch Messung gefundenen Werthen differiren, und das schematische Auge zu einem solchen optischen System machen, dass dessen hinterer Brennpunkt in die Ebene der Netzhaut fällt. Weil nun in diesem Punkte Lichtstrahlen, die parallel mit der Axe einfallen, ihre Vereinigung finden, so verhält sich das schematische Auge derartig, wie man es gewöhnlich von einem natürlichen, normalsichtigen Auge annimmt, wenn dasselbe auf ein unendlich entferntes Object, d. h. für parallele Strahlen eingestellt ist.

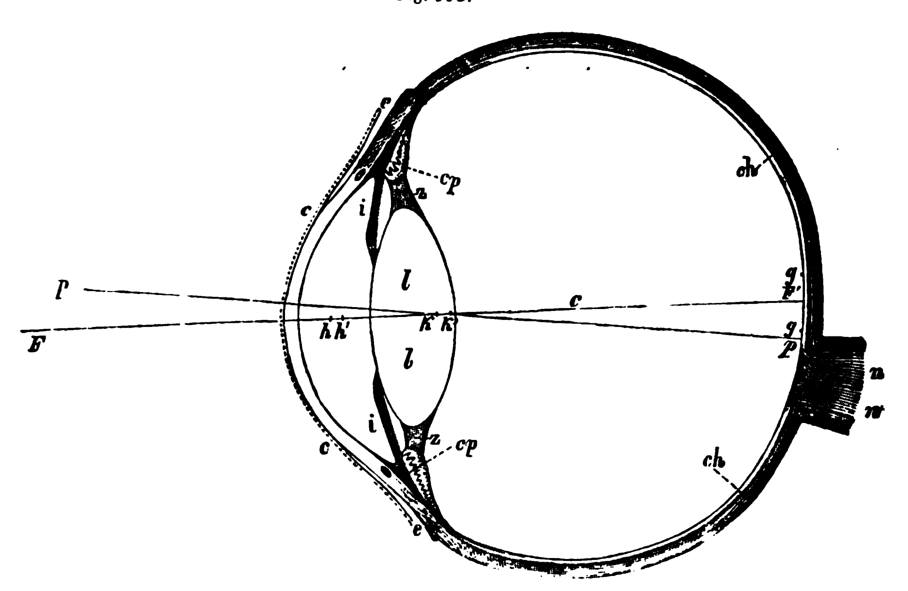
156. Die optischen Medien des schematischen Auges sind nun, von aussen nach innen gerechnet: Luft, Hornhaut, wässrige Feuchtigkeit, Linse und Glasfeuchtigkeit. Doch sieht man dabei von der Hornhaut ab und denkt sich die wässerige Feuchtigkeit bis zur vorderen Fläche dieser Haut in der der letzteren zugehörigen Form ausgedehnt, was insofern erlaubt ist, als die hintere Fläche der Hornhaut mit der vorderen concentrisch verläuft, auch die Dicke der Hornhaut nicht bedeutend und ihr Brechungsvermögen nur wenig von dem der wässerigen Feuchtigkeit verschieden ist.

Zu den optischen Constanten des schematischen Auges, dessen Durchschnitt Fig. 118 in dreimaliger Linearvergrösserung zeigt, gehören die Brechungsverhältnisse der genannten drei Medien, die



Halbmesser der Hornhaut, der vorderen und hinteren Linsenfläche, sowie endlich die Entfernung des Scheitels der Hornhaut vom


Fig. 118.



Scheitel der vorderen Linsenfläche und der Abstand des letzteren von dem Scheitel der hinteren Linsenfläche. Setzt man nun das Brechungsvermögen der Luft = 1, so ist das Brechungsverhältniss der Hornhaut und wässerigen Feuchtigkeit = $\frac{103}{77}$, das der Linse = $\frac{16}{11}$ und das der Glasfeuchtigkeit wieder = $\frac{103}{77}$.

Ferner ist

der Krümmungshalbmesser der Hornhaut	8	Millim.
„ „ „ vorderen Linsenfläche	10	„
„ „ „ hinteren „	6	„
Abstand der Hornhautscheitels vom Scheitel der vorderen Linsenfläche	4	„
Abstand der Scheitel der vorderen und hinteren Linsenfläche (= Linsenaxe)	4	„

Mit Benutzung dieser Constanten erhielt Listing auf dem Wege der Rechnung folgende numerische Werthe, durch welche die Lage der optischen Cardinalpunkte bestimmt ist. Es beträgt nämlich:

der Abstand des ersten Brennpunktes F (Fig. 118) vom Hornhautscheitel	12,8326 mm
Abstand des zweiten Brennpunktes F' von der hinteren Linsenfläche	14,6470 „
Abstand des ersten Hauptpunktes h von dem Hornhautscheitel	2,1746 „
Abstand des zweiten Hauptpunktes h' von dem Hornhautscheitel	2,5724 „
Abstand des ersten Knotenpunktes k vom Hornhautscheitel	7,2420 „
Abstand des ersten Knotenpunktes von der hinteren Linsenfläche	0,7850 „
Abstand des zweiten Knotenpunktes k' vom Hornhautscheitel	7,6398 „
Abstand des zweiten Knotenpunktes von der hinteren Linsenfläche	0,3602 „
Erste Hauptbrennweite Fh	15,0072 „
Zweite „ $F'h'$	20,0746 „
Abstand der beiden Hauptpunkte h, h' voneinander .	0,3978 „
„ „ „ Knotenpunkte k, k' voneinander	0,3978 „
Abstand des Drehpunktes C vom Hornhautscheitel .	12 „

Neuere Messungen und Berechnungen von Helmholtz gestatten, die von Listing eingeführten optischen Constanten in der Dioptrik des Auges beizubehalten, ungeachtet einige der aufgestellten Werthe nicht ganz mit den durch Messung an lebenden Augen erhaltenen Resultaten harmoniren. So ist der von Listing erhaltene Krümmungshalbmesser der Hornhaut etwas zu gross, während die für die Linse angegebenen Werthe, nämlich ihre Dicke, Brennweite und der Abstand ihrer Vorderfläche von der Hornhaut wahrscheinlich nur einem nahesehenden Auge entsprechen.

157. Die gegenseitige Lage irgend eines Objects- und zugehörigen Bildpunktes ergibt sich nun nach §. 38 ff. (Abthl. I) mittelst der ersten und zweiten Richtungslinie, von welchen jene vom Objectpunkte nach dem vorderen Knotenpunkte k, die andere aber parallel damit vom zweiten Knotenpunkte k' nach der Retina gerichtet ist (Fig. 118). Bei der Fixation eines Punktes trifft die eben bezeichete Richtungslinie die Stelle des schärfsten Sehens auf der Retina. Und die nach dieser Stelle gezogene Richtungslinie nennt man auch die **Gesichtslinie**, die übrigens nach Helmholtz nicht,

wie man wohl sonst allgemein annahm, ganz mit der Augenaxe *FF'* zusammenfällt, sondern mit derselben einen Winkel einschliesst. Die Stelle des schärfsten Sehens auf der Retina liegt etwas nach aussen und in der Regel ein wenig nach unten von dem hinteren Endpunkte der Augenaxe.

158. Der Umstand, dass die beiden Hauptpunkte h, h' sowohl als auch die beiden Knotenpunkte k, k' nur wenig von einander abstehen, führte*) zu einer Reduction des schematischen Auges auf eine einzige brechende Fläche von spärischer Gestaltung mit einem Krümmungshalbmesser von $5{,}1248^{mm}$, welche auf der einen Seite von der Luft, auf der andern von der Glasfeuchtigkeit begrenzt wird. Hiernach erscheint das Auge als ein optischer Apparat aus einer einzigen brechenden Substanz, deren sphärisch convexe Fläche gegen die Luft gekehrt ist und deren Brechungsverhältniss $\frac{103}{77}$ beträgt. In dem so reducirten Auge sind die beiden Hauptpunkte des schematischen Auges zu einem einzigen Hauptpunkte vereinigt, der in dem Scheitel der brechenden Fläche liegt, während auch die beiden Knotenpunkte des letztgenannten Auges in Einen Punkt fallen, der mit dem Krümmungsmittelpunkte der brechenden Fläche übereinkommt. Die beiden Brennpunkte F und F' behalten ihre Lage. Der Hauptpunkt des reducirten Auges liegt aber $2{,}3448^{mm}$ und der Knotenpunkt desselben $7{,}4696^{mm}$ hinter dem Scheitel der Hornhaut, an deren Stelle sich die gedachte brechende Fläche befindet. Den Knotenpunkt des reducirten Auges nennt man nach dem Vorgange Volkmann's den Kreuzungspunkt der Richtungslinien (oder Richtungsstrahlen).

159. Nach den aufgestellten dioptrischen Gesetzen müssen nun zwar die Strahlen, die von den verschiedenen Punkten eines leuchtenden Objects ausgehen, sich im Hintergrunde des Auges zu einem verkehrten, dem Object an Form und Farbe ähnlichen Bilde vereinigen; allein das letztere ist für das deutliche Sehen nur dann von Bedeutung, wenn die Vereinigungspunkte der betreffenden Strahlen nicht allzuweit vor oder hinter die Netzhaut des Auges fallen, d. h. wenn das Bild nahezu auf die empfindliche Schicht der Netzhaut selbst fällt. Das deutliche Sehen eines Objects erfordert also ein deutliches Bild desselben auf der Netzhaut. Fallen die Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen zuweit vor oder hinter die

---

*) s. Listing a. a. O. S. 493.

Retina, so entsteht auf dieser nicht ein deutliches Bild des zu sehenden Objects, sondern statt einzelner deutlicher Bildpunkte, die bestimmten Objectpunkten entsprechen, **Zerstreuungskreise**, in der Art, dass Strahlen, die von verschiedenen Objectpunkten ausgehen, denselben Netzhautpunkt treffen. Indem nämlich je zwei benachbarte Zerstreuungskreise innerhalb des Netzhautareals, das von dem Strahlensysteme eines leuchtenden Objects afficirt wird, sich mehr oder minder decken, geschieht es, dass dieselben Netzhautelemente von verschiedenen Objectpunkten Eindrücke empfangen, die sich gegenseitig stören und kein bestimmtes Sehen der verschiedenen Objectpunkte zulassen.

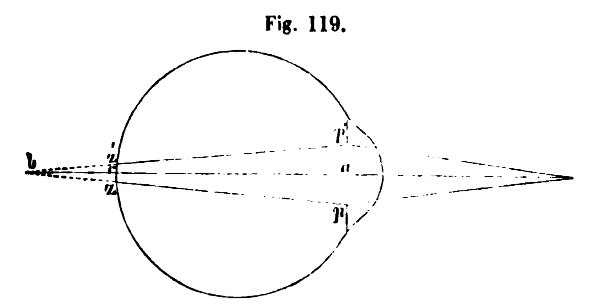
Es ist nicht zu verkennen, dass, wenn man den brechenden Apparat des Auges als unveränderlich annimmt, die Strahlen eines leuchtenden Punktes nur dann auf der Netzhaut selbst vereinigt werden können, wenn sich der leuchtende Punkt gerade in einer bestimmten Entfernung vom Auge befindet. Entfernt sich der Lichtpunkt vom Auge mehr und mehr, so wird sein Bild immer mehr an punktueller Bestimmtheit verlieren und sich zu einem Zerstreuungskreise ausdehnen. In diesem Falle vereinigen sich nämlich die Strahlen schon vor der Netzhaut, die sie dann von dem Vereinigungspunkte aus divergirend treffen. Dagegen geschieht die Vereinigung der Strahlen, wenn sich der leuchtende Punkt über eine gewisse Grenze hinaus dem Auge nähert, erst hinter der Retina, und auf dieser entsteht gleichfalls ein Zerstreuungskreis xx' (Fig. 119).

160. Das schematische Auge dachten wir uns so, dass parallele Strahlen durch dasselbe innerhalb der hinteren Brennpunktsebene, die mit der Retina zusammenfällt, in einem Punkte vereinigt werden. Nähert sich nun ein leuchtender Punkt aus unendlicher Ferne allmälig dem Auge, so wird sein Bild aus der hinteren Brennpunktsebene herausrücken und sich von derselben immer weiter entfernen, jedoch anfänglich nur sehr wenig, während der Lichtpunkt mit gleichmässiger Geschwindigkeit an das Auge heranrückt, d. h. das Bild bewegt sich anfangs langsamer als das Object. Je mehr sich aber das letztere dem Auge nähert, desto schneller wird die Bewegung des Bildes, und sie wird unendlich gross, wenn der leuchtende Punkt in die vordere Brennebene eintritt; d. h. die Vereinigung der Strahlen, die nun im letzten Medium des Auges untereinander parallel sind, geschieht erst in un-

endlicher Entfernung, oder mit anderen Worten, es findet gar keine Vereinigung dieser Strahlen zu einem Bildpunkte statt. In demselben Masse nun, in welchem die Geschwindigkeit wächst, womit sich der Vereinigungspunkt der Strahlen oder das Bild des leuchtenden Punktes von der Netzhaut entfernt, wächst auch die Grösse der Zerstreuungskreise auf der Netzhaut.

Listing hat die Grösse der Zerstreuungskreise berechnet, wenn sich ein Object aus unendlicher Ferne bis auf 88 Millimeter Abstand dem schematischen Auge nähert. So lange ein leuchtender Punkt in unendlicher Entfernung steht, also seine Strahlen untereinander parallel ins Auge fallen, ist der Zerstreuungskreis = 0, so dass dem leuchtenden Punkte in diesem Falle ein punktuelles Bild auf der Retina entspricht. Die Grundlage zu dieser

Fig. 119.



Rechnung bildet aber die Aehnlichkeit der Dreiecke pbp' und zbz', aus welchen, weil der kleine Bogen zz' sich als eine gerade Linie betrachten lässt, folgt $pp' : ab = zz' : cb$, daher $zz' = pp' \cdot \frac{cb}{ab}$.

Die Grösse des Zerstreuungskreises zz' auf der Retina ist also proportional der Pupillenweite pp' und dem Abstande des Vereinigungspunktes b der Strahlen von der Netzhaut. Will man nun aus der vorstehenden Gleichung die Grösse des Zerstreuungskreises für einen gegebenen Abstand des Lichtpunktes vom Auge ermitteln, so muss ausser der Pupillenweite und dem Abstande der Pupillenebene von der Netzhaut noch die Entfernung des Bildpunktes von der Netzhaut gegeben sein. Diese Entfernung ist aber gleich dem Producte aus den beiden Brennweiten (des schematischen Auges) dividirt durch den Abstand des leuchtenden Objects vom ersten Brennpunkte (F, Fig. 118), also jenes Product nach den auf S. 250 gegebenen Werthen $= 15{,}00 \cdot 20{,}07 = 301{,}26$ □mm. Der



Durchmesser der Pupille lässt sich zu 4^{mm} und der Abstand der Pupillenebene von der Retina zu $19{,}15^{mm}$ annehmen. — Die Resultate von Listing's Rechnung enthält nachstehende Tabelle.

Abstand des leuchtenden Punktes vom vorderen Brennpunkte des Auges.	Abstand des Bildes von der Netzhaut.	Durchmesser des Zerstreuungskreises.
unendlich.	0^{mm}	0^{mm}
65 Meter.	$0{,}005^{mm}$	$0{,}0011^{mm}$
25 „	0,012	0,0027
12 „	0,025	0,0056
6 „	0,050	0,0112
3 „	0,100	0,0222
1,5 „	0,200	0,0443
0,75 „	0,400	0,0825
0,375 „	0,800	0,1616
0,188 „	1,600	0,3122
0,094 „	3,200	0,5768
0,088 „	3,42	0,6484

161. Aus dieser Tabelle erkennt man, dass der Durchmesser der Zerstreuungskreise, wie bereits angedeutet, mit der allmäligen Annäherung des unendlich fern gedachten Lichtpunktes anfangs sehr langsam wächst. So wird durch die so bedeutende Versetzung des leuchtenden Punktes aus unendlicher Ferne bis auf 65 Meter Abstand vom Auge der Vereinigungspunkt der Strahlen nur um 0,005 Millimeter von der hinteren Brennebene, d. h. von der Netzhaut entfernt, während der Zerstreuungskreis dem entsprechend nur von 0 bis 0,0011 Millimeter zunimmt. Dagegen entspricht weiterhin, wenn der Lichtpunkt dem Auge bereits viel näher steht, einer geringen Annäherung desselben eine sehr beträchtliche Entfernung des Vereinigungspunktes von der Netzhaut und demgemäss auch eine viel stärkere Zunahme des Zerstreuungskreises, wie ein Blick auf die weiter unten stehenden Zahlen der obigen Tafel sofort erkennen lässt.

Es ist nun selbstverständlich, dass die durch die Zerstreuungskreise bewirkte Undeutlichkeit des Sehens desto geringer ausfallen muss, je kleiner diese Zerstreuungskreise sind, und dass es für die letzteren eine Grenze geben wird, unterhalb deren sie keine bemerkbare Undeutlichkeit mehr verursachen. Diese Grenze ist

aber durch die Grösse derjenigen Netzhautelemente gegeben, die einzeln zur Erzeugung einer besonderen Lichtempfindung wirksam sind. Ist nun die im §. 134 beschriebene Stäbchen- und Zapfenschicht der Retina das lichtpercipirende Organ (s. §. 138 f.) und stellt dasselbe, wie man sagt, eine Mosaik von sensibeln Elementen vor, so werden zwei Objectpunkte, deren Strahlen in zwei verschiedenen Zapfen ihre Vereinigung finden, zwei gesonderte Empfindungen liefern, während dagegen alle Strahlen, die von verschiedenen Objectpunkten kommend einen Zapfen treffen, auch nur zu einer Empfindung führen. Nun kann ein Zerstreuungskreis das deutliche Sehen nicht beeinträchtigen, falls seine Grösse den Durchmesser eines Zapfens nicht überschreitet, also auch kein theilweises Decken benachbarter Zerstreuungskreise stattfindet. Mag daher innerhalb eines Zapfens der Vereinigungspunkt der von einem Objectpunkte kommenden Lichtstrahlen sich immerhin zu einem Zerstreuungskreise ausdehnen; die Deutlichkeit des Sehens, d. h. die Unterscheidung der verschiedenen Punkte eines leuchtenden Objects, kann darunter nicht leiden, und auch nicht gewinnen, wenn der auf einen Zapfen beschränkte Zerstreuungskreis sich auf einen mathematischen Punkt reducirt. So wird, wenn man den Durchmesser eines Zapfens am gelben Fleck zu 0,0025 — 0,0030''' nimmt, ein Zerstreuungskreis von 0,0011^{mm} gewiss schon unterhalb der Grenze liegen, bei deren Ueberschreitung die Zerstreuungskreise überhaupt das deutliche Sehen alteriren.

162. Wird dem brechenden System des Auges eine unveränderliche Einrichtung zugeschrieben und besitzt überdies auch die Netzhaut, auf der sich die Bilder äusserer Objecte darstellen sollen, zu demselben System eine unveränderliche Lage; so ist es gewiss, dass nur von Objecten, die sich gerade in gewissen Entfernungen vom Auge befinden, vollkommen deutliche Bilder auf der Retina entstehen können. Es verhält sich dann hier wie mit den Bildern einer Sammellinse (in unseren optischen Instrumenten), die ihren Ort mit der Entfernung des Gegenstandes von der Linse (oder dem Linsensysteme) verändern, so dass eine Verschiebung der letzteren oder bei unveränderter Lage derselben eine Veränderung ihrer Gestalt (Krümmung) erforderlich ist, wenn das Bild des Objects für verschiedene Entfernungen vom Apparate in derselben festen Ebene deutlich zu Tage treten soll; oder es muss umgekehrt der

Schirm, auf welchem das Bild scharf hervortreten soll, in angemessener Weise seine Lage verändern.

Da wir nun mit unserm Auge wirklich Objecte in sehr verschiedenen Entfernungen nacheinander deutlich sehen können, so besitzt dasselbe wohl die Fähigkeit, sich nacheinander den verschiedenen Entfernungen der zu sehenden Objecte anzupassen oder dergestalt zu verändern, dass die von diesen Objecten kommenden Strahlen auf der Retina zu scharfen Bildern vereinigt werden. Und diese Fähigkeit des Auges, sich innerhalb gewisser Grenzen den ungleichen Entfernungen der Objecte anzupassen oder für diese Entfernungen dergestalt einzurichten, dass nacheinander scharfe Objectbilder auf der Retina entstehen, nennt man gewöhnlich das Accommodationsvermögen, wohl auch das Adaptions- oder Adjustirungsvermögen des Auges.

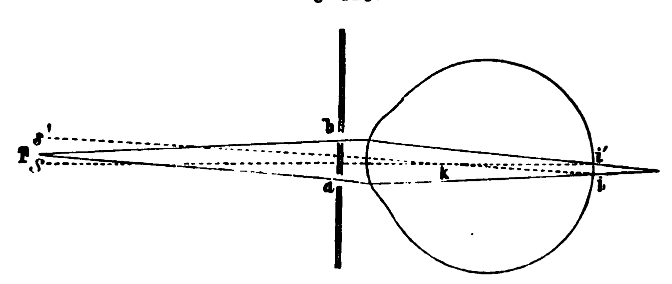
Nur nacheinander können wir zwei Objecte, die in verschiedenen Entfernungen vom Auge liegen, deutlich sehen, nicht gleichzeitig, so dass uns, wenn wir eines derselben deutlich sehen, das andere undeutlich erscheint. Fixirt man z. B. die Spitze eines in einer gewissen Entfernung vom Auge gehaltenen Fingers oder einer Feder, so wird man dieses Object scharf wahrnehmen, andere beträchtlich weiter entfernte Objecte aber, z. B. die Druckschrift eines aufgeschlagenen Buches, gleichzeitig sehr undeutlich, selbst wenn dieselbe in einem solchen Abstande vom Auge liegt, dass man sie allein sehr wohl erkennen kann. Umgekehrt wird das dem Auge nähere Object undeutlich erscheinen, wenn man das entfernte fixirt und deutlich sieht. Unter diesen Umständen vereinigen sich die vom fixirten Objecte kommenden Strahlen, — sei es nun das nähere oder entferntere, — auf der Retina zu einem deutlichen Bilde, während die Strahlen des nicht fixirten Objects sich vor oder hinter der Retina vereinigen und auf dieser ein mit Zerstreuungskreisen versehenes Bild liefern.

163. Ein Zeugniss für die Accommodationsfähigkeit des Auges und deren Nothwendigkeit gewährt auch der nach Scheiner benannte Versuch*). Man macht in eine undurchsichtige Platte, z. B. in ein Kartenblatt, zwei feine Nadellöcher, deren Abstand etwas kleiner ist als der Durchmesser der Pupille, und bringt sie dicht vor ein Auge, um durch dieselben nach einem Object, etwa

*) S. Porterfield: On the Eye I. Edinb. Med. Ess. IV. 185.

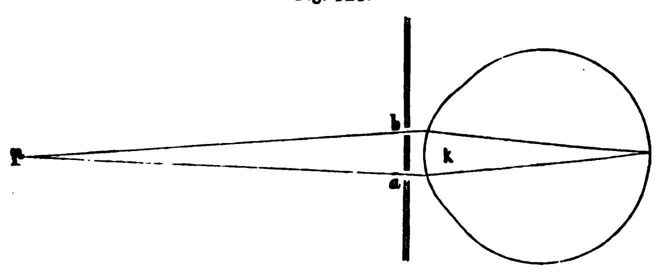
nach der Spitze oder dem Knopfe einer Nadel, zu sehen. Dasselbe erscheint dann doppelt, wenn es sich nahe vor dem Auge, ungefähr in der Richtung seiner Axe, befindet. Hier gelangen nämlich durch die beiden Oeffnungen zwei sehr feine Strahlenbündel von dem Object p ins Auge. Diese Bündel convergiren aber nach einem

Fig 120.



Punkte hinter der Netzhaut und afficiren diese selbst in zwei verschiedenen Punkten i und i', welche zwei isolirte Punkte des einen Zerstreuungskreises sind, der auf der Retina entstehen würde, wenn die übrigen Strahlen nicht durch das Kartenblatt aufgefangen wären. Das Auge ist aber in diesem Falle, wo also das nahe gelegene Object doppelt erscheint, nicht für die Entfernung desselben eingerichtet. Rückt man das Object weiter vom Auge hinweg, so rücken die beiden Netzhautbilder i, i' (in Fig. 120) einander näher,

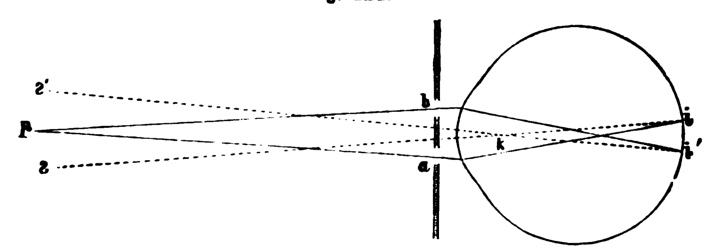
Fig. 121.



so dass sie, wenn das Object eine gewisse Entfernung vom Auge erreicht hat, ganz zusammenfallen (Fig. 121); das Object erscheint dann einfach. Bei noch grösserer Entfernung aber erscheint es von einem gewissen Punkt an wieder doppelt, weil die beiden durch die Oeffnungen ausgesonderten feinen Strahlenbündel nach

ihrer Durchkreuzung vor der Retina diese letztere wieder in zwei verschiedenen Punkten afficiren, die auch hier zwei isolirte Punkte

Fig. 122.



des einen Zerstreuungskreises sind, der ohne die beiden Oeffnungen auf der Netzhaut entstehen würde. Nur haben in diesem Falle die beiden Bilder (Fig. 122) eine andere Lage: das von derselben Oeffnung herrührende Bild, welches im vorigen Falle rechts erschien, erscheint jetzt links und umgekehrt. Schliesst man eine der Oeffnungen, so verschwindet in dem ersten Falle (Fig. 120), wo die beiden Strahlenbündel nach einem Punkte hinter der Retina convergiren, das Bild der entgegengesetzten Seite, im andern Falle aber (Fig. 122) das auf derselben Seite erscheinende Bild. Die Lage der in unserem Sehfelde erscheinenden Doppelbilder *s*, *s'* bestimmt sich in Bezug auf die zugehörigen Retinabilder *i*, *i'* leicht mittelst der Richtungslinien *is* und *i's'*, die von den Punkten *i*, *i'* durch den Kreuzungspunkt *k* nach aussen gezogen und in den Figuren 120 und 122 punktirt angegeben sind.

In dem zuerst betrachteten Falle (Fig. 120) ist nun das Auge für eine grössere, im andern (Fig. 122) für eine geringere Entfernung als die des Objects eingerichtet. Unter gewissen Umständen ist es aber durch willkürliche Anstrengung möglich, bei anfänglich unangemessener Einstellung des Auges für ein Object, wo dieses doppelt erscheint, ein Zusammenfallen beider Bilder zu bewirken, was wohl entschieden auf eine derartige Veränderung des Auges hindeutet, die man durch den Ausdruck „Accommodation" bezeichnet.

164. Jedenfalls lässt sich aus dem Scheiner'schen Versuche entnehmen*), dass das Auge nicht im Stande ist, Objecte von ver-

*) s. Volkmann in R. Wagner's Handw. der Phys., Art. Sehen, Bd. 3. S. 296.

schiedener Entfernung gleichzeitig mit derselben Deutlichkeit wahrzunehmen, was freilich auch schon aus dem in §. 162 beschriebenen Versuche folgt. Mittelst der oben erwähnten feinen Löcher sehe man mit einem Auge nach zwei Nadeln, die vertikal in ungleichen Entfernungen vom Auge, aber innerhalb der Grenzen des deutlichen Sehens, etwa auf einem Brettchen, aufgesteckt sind. Dann erscheint allemal, wenn man die eine fixirt, die andere doppelt. Bei Fixation der entfernteren ist das Auge für diese eingestellt, und sie erscheint einfach, indem die von ihr herkommenden Strahlen auf der Netzhaut selbst zu einem Bilde vereinigt werden (Fig. 121), während die Strahlenbündel der näheren, wie in Fig. 120, nach einem Punkte hinter der Netzhaut convergiren und auf dieser zwei matte Bilder erzeugen. Fixirt man umgekehrt die nähere Nadel, so vereinigen sich ihre Strahlen, wie in Fig. 121, zu einem deutlichen Bilde auf der Netzhaut, wogegen die beiden durch die Löcher gesonderten Strahlenbündel der entfernteren Nadel vor der Retina sich durchkreuzen und auf der letzteren wieder zwei Bilder bewirken (Fig. 122). Aus beiden Fällen folgt, in Uebereinstimmung mit den bereits dargelegten dioptrischen Gesetzen, dass, wenn das Auge auf ein bestimmtes Object gerichtet ist, das Licht eines näheren oder ferneren Objects nicht auf der Retina, sondern hinter oder vor derselben vereinigt wird, sowie auch, dass wir durch eine willkürliche Anstrengung das Auge befähigen können, nacheinander bald das nähere, bald das entferntere Object deutlich wahrzunehmen.

Dass bei zu grosser oder geringer Entfernung der Objecte vom Auge die erzeugten Bilder bei unverändertem Auge vor oder hinter die Netzhaut fallen, und dass in beiden Fällen kein deutliches Sehen ohne Accomodation möglich ist, lässt sich auch noch aus einigen Versuchen schliessen, die Gerling*) an ausgeschnittenen Ochsen- und Pferdeaugen machte, indem er im Hintergrunde derselben an der Stelle der Retina ein dünnes Glasplättchen einschob, auf welchem sich die Bilder äusserer Gegenstände, deren Strahlen durch das Auge gegangen, scharf darstellten und mittelst einer Loupe beobachtet werden konnten. Es fand sich, dass die Bilder entfernter Gegenstände auf dieses Plättchen oder in das

*) Poggend. Ann. Bd. XLVI. S. 243.

Innere des Auges, die Bilder naher Gegenstände aber hinter die Netzhaut fielen.

165. Indessen hat die Accommodationsfähigkeit für jedes Auge ihre Grenzen, die durch den sog. Nähe- oder Fernpunkt charakterisirt sind. Jener bezeichnet die geringste, dieser die grösste Entfernung, für welche noch eine vollständige Accommodation und somit ein deutliches Sehen eines Objects möglich ist. Den Raum zwischen diesen beiden Punkten nennt man die deutliche Sehweite, innerhalb welcher ein Object, wo es sich auch daselbst befinden mag, deutlich gesehen werden kann, weil eben das Auge für alle zwischen dem Nähe- und Fernpunkt gelegene Objecte die Fähigkeit besitzt, sich nacheinander so zu verändern, dass die von denselben kommenden Strahlen zu deutlichen Bildern auf der Retina vereinigt werden, während für die Strahlen solcher Objecte, die diesseits des Nähepunktes und jenseits des Fernpunktes liegen, keine derartige Vereinigung stattfindet. In beiden letzteren Fällen entstehen auf der Retina die früher besprochenen Zerstreuungskreise, indem die Strahlen eines Objects, das weiter als der Fernpunkt vom Auge liegt, sich vor der Retina, die eines diesseits des Nähepunktes gelegenen aber hinter derselben zu vereinigen streben. So erscheint ein Object, z. B. ein Stecknadelknopf, welchen man dem Auge zu nahe bringt, in Folge der Zerstreuungskreise auf der Netzhaut sehr undeutlich. Und bekanntlich werden diese Zerstreuungskreise desto grösser, je näher das Object dem Auge kommt, während auch die Vereinigungspunkte der Strahlen um so weiter hinter die Retina fallen. Bringt man aber in diesem Falle zwischen das Auge und das zu nahe befindliche Object eine Platte mit einer feinen Oeffnung, um durch diese das Object zu betrachten, so erscheint dasselbe wieder deutlich, weil nun wegen Abhaltung der Randstrahlen die störenden Zerstreuungskreise verkleinert werden.

166. Den numerischen Werth der Sehweite bestimmt man durch besondere Vorrichtungen, die man Optometer nennt. Einige derselben stützen sich auf den S. 256 f. beschriebenen Scheiner'schen Versuch. Man bringt nämlich wie dort vor die beiden dem Auge nahe befindlichen Oeffnungen ein Object, etwa die Spitze einer Nadel, so dass es wegen allzugrosser Nähe im Doppelbilde erscheint, und entfernt es hiernach allmälig mehr und mehr vom Auge, wo dann ein Punkt, der sog. Nähepunkt,

kommen wird, worin die Spitze einfach erscheint; bei weiterer Fortbewegung von diesem Punkte ab wird sie auf eine gewisse Strecke einfach bleiben: bis zu einem gewissen anderen Punkte, dem Fernpunkte, und dann wieder doppelt erscheinen. Die Länge dieser Strecke zwischen dem Nähe- und Fernpunkte, innerhalb deren die Nadel einfach erscheint, gibt die deutliche Sehweite für das dem Versuche unterworfene Auge. Man kann indess anstatt der Nadel oder überhaupt statt eines opaken Objects auch zweckmässig eine schmale Spalte in einem undurchsichtigen Schirme verwenden, indem man dieselbe ebenso wie die Nadelspitze dem Auge nähert und von ihm entfernt, während dicht vor demselben eine Platte mit zwei feinen Oeffnungen oder zwei schmalen Spalten angebracht ist.

Nach einem von Helmholtz angegebenen optometrischen Verfahren sieht man durch eine feine Oeffnung nach einer Lichtquelle oder überhaupt nach einer hellen Stelle hin, so dass durch dieselbe ein Lichtbündel in das Auge dringen kann. Dann erscheint die Oeffnung, wenn das Auge für ihre Entfernung eingestellt ist, im Ganzen gut begrenzt, im Gegentheil aber als ein mehrstrahliger Stern. Wird nun ein Schirm von der Seite her vor die Pupille geschoben, so verdunkelt sich ein Theil der Lichtfigur, entweder von derselben Seite her, von welcher man den Schirm einschiebt, oder von der entgegengesetzten, je nachdem die Entfernung der Oeffnung grösser oder kleiner als die Accommodationsdistanz ist. Bei richtiger Einstellung des Auges verdunkelt sich die Figur, während man den Schirm einschiebt, entweder in allen Theilen gleichmässig oder unregelmässig von verschiedenen Seiten zugleich.

167. Die deutliche Sehweite sowohl als auch der Abstand ihrer Grenzpunkte von dem Hornhautscheitel sind nicht allein bei verschiedenen Personen, sondern auch gar häufig für beide Augen eines und desselben Individuums verschieden. Auch bedingen verschiedene Umstände, die wir späterhin anführen werden, eine Veränderlichkeit dieser Grössen. Ganz Aehnliches gilt von der sog. mittleren Sehweite, worunter man gewöhnlich die Entfernung vom Auge versteht, worin dieses ein kleineres Object, z. B. die Druckschrift eines Buches, noch deutlich sehen kann. Man macht von ihr Gebrauch bei Ermittelung der Vergrösserungszahl eines Mikroskopes. So wird die Vergrösserung eines einfachen Mikroskopes (nach §. 32) durch den Quotienten ausgedrückt, dessen

Zähler die mittlere Sehweite und dessen Nenner die Brennweite der betreffenden Linse ist. Diese Sehweite ist eigentlich für jedes Auge besonders zu bestimmen, und man erkennt leicht, wie zu diesem Behufe die oben erwähnten optometrischen Vorrichtungen benutzt werden können. Häufig begegnet man Angaben von 8 bis 10 Par. Zollen.

Nach einem von Holke beschriebenen Verfahren spannt man, um die deutliche Sehweite zu bestimmen, von dem unteren Augenlide an einen Faden aus und markirt die Stelle, wo er am deutlichsten erscheint; hier stellt sich derselbe am dünnsten dar, während er diesseits und jenseits dieser Stelle immer breiter wird, so dass er die Gestalt zweier sich zugekehrter Pyramiden oder Kegel gewinnt, die an der Stelle des deutlichsten Sehens zusammenfliessen.

Fig. 123.

168. Hier sei nun noch hervorgehoben, dass das Auge genau genommen niemals nur für einen einzigen Punkt, sondern für eine Linie eingestellt ist, die sich diesseits und jenseits des Punktes erstreckt, für welchen das Auge sich gerade adaptirt hat. Man nennt, nach dem Vorgange Czermak's, diesen Punkt den **Accommodationspunkt** und jene Linie die **Accommodationslinie**, die nicht zu verwechseln ist mit dem oben charakterisirten Spielraum der deutlichen Sehweite, innerhalb dessen sich ein Object ohne Beeinträchtigung des deutlichen Sehens bewegen darf. Der Nähe- und Fernpunkt bezeichnen die Grenzen, für welche es dem Auge überhaupt noch möglich ist, sich nacheinander so zu verändern, als es zum deutlichen Sehen der Objecte in verschiedenen Entfernungen erforderlich ist. Die Accommodationslinie ist dagegen der Inbegriff derjenigen Punkte, welche gleichzeitig von dem gerade für irgend einen bestimmten Punkt accommodirten Auge deutlich gesehen werden können. In nebenstehender Figur bezeichnet *b* den Accommodationspunkt und *ac* die Accommodationslinie, über welche hinaus, diesseits von *a* und jenseits von *c*, die Undeutlichkeit mit wachsender Entfernung von diesen Punkten zunimmt. Die Existenz der Accommodationslinie ist wohl grösstentheils, wenn nicht einzig, durch den Umstand bedingt, dass die Zerstreuungskreise auf der Netzhaut unterhalb einer gewissen Grenze die Deutlichkeit des Sehens

Fig. 124.

nicht mehr alteriren, wie denn auch Czermak's *) Betrachtungen über diesen Gegenstand sich auf die von Listing berechnete Tabelle über die Grösse der Zerstreuungskreise stützen. Sehen wir auf diese Tabelle (S. 254) zurück, so findet sich, dass ein Gegenstand, dessen Distanz von dem für unendliche Ferne eingestellten schematischen Auge 65 Meter beträgt, bei diesem Accommodationszustande eben so deutlich erscheinen wird als irgend ein anderes so weit entferntes Object, dass seine Strahlen untereinander parallel ins Auge dringen. Denn der Durchmesser des Zerstreuungskreises beträgt hier für den 65 Meter entfernten Gegenstand nur 0,0011 Millimeter; woraus folgt, dass das für unendliche Ferne accommodirte Auge zugleich für alle Objecte eingerichtet ist, deren Entfernung grösser als 65 Meter ist. In diesem Falle erstreckt sich die Accommodationslinie von einem Punkte, der 65 Meter vom Auge entfernt liegt, bis in die unendliche Ferne. Wenn aber ein Object dem für einen bestimmten Punkt adaptirten Auge verhältnissmässig nahe liegt, veranlasst schon eine geringe Verrückung desselben eine sehr bedeutende Zunahme der Zerstreuungskreise, wie gleichfalls ein Blick auf die Tabelle lehrt. Die Accommodationslinie kann dann sehr kurz sein.

Im Allgemeinen gilt nun der Satz, dass die Accommodationslinie um so länger ist, je weiter der zugehörige Accommodationspunkt vom Auge entfernt liegt, und desto kürzer, je näher dieser Punkt dem Auge ist.

169. Um die Accommodationslinie durch einen Versuch zu veranschaulichen, spannt man vor einem Auge nahezu in der Richtung seiner Axe einen langen dünnen Faden aus und fixirt einen Punkt desselben. Man sieht dann zu beiden Seiten des fixirten Punktes, des Accommodationspunktes, eine gewisse Strecke des Fadens vollkommen deutlich, während der Faden über dieselbe hinaus verwaschen (in Zerstreuungsbildern) erscheint, und zwar, wie es Fig. 124 zeigt, conisch erweitert und desto breiter, je weiter die Stücke der beiden durch die scharf begrenzte Accommodationslinie gebildeten Abtheilungen von dem Accommodationspunkte entfernt liegen. Fixirt man allmälig näher und näher gelegene und ebenso auch allmälig weiter und weiter entfernte Punkte des Fadens, so lässt

*) Physiol. Studien, 1. und 2. Abthl.: Sitzungsberichte der k. k. Acad. der Wissensch. in Wien, Bd. XII. u. XV.

sich auch erkennen, dass die Accommodationslinie für einen näher gelegenen Fixations- oder Accommodationspunkt kürzer ist als für einen entfernteren, und dass mit wachsender Entfernung dieses Punktes vom Auge die Begrenzung der Accommodationslinie an Schärfe abnimmt.

Czermak gibt noch folgenden hierauf bezüglichen Versuch an. Eine Glasplatte, auf die man einen schwarzen Punkt gemacht, hält man vor eine Druckschrift und nähert ihr das Auge so weit, als es eben thunlich ist, ohne den Punkt undeutlich zu sehen. Man kann dann abwechselnd die Schrift und den Punkt deutlich sehen, je nachdem man diesen oder jenen fixirt, wo also das nicht fixirte Object undeutlich erscheinen wird. Wenn man sich aber mit dem Auge immer weiter von der Glasplatte entfernt, nimmt die Undeutlichkeit des nicht fixirten Objects mehr und mehr ab, so dass endlich bei einem gewissen Abstande des Auges beide Objecte: Schrift und Punkt, gleich deutlich erscheinen. Beide liegen dann in einer und derselben Accommodationslinie.

170. Aus dem, was wir über das Wachsthum der Zerstreuungskreise erkannt haben, lässt sich mit Czermak noch folgern, dass der Accommodationspunkt nicht in der Mitte der Accommodationslinie, sondern dem nach dem Auge zugekehrten Ende dieser Linie näher als ihrem anderen Endpunkte liegt (Fig. 124). Auch ergibt sich aus dem Wachsthum der Zerstreuungskreise, wie es die Listing'sche Tafel an den Tag legt, mit Evidenz, dass das deutliche Sehen näher gelegener, aber vom Auge ungleich entfernter Punkte nicht allein eine Accommodation nothwendig erfordert, sondern diese auch im grösseren Masse erheischt, als das deutliche Sehen in weitere Fernen, da hier eine gleich grosse Bewegung des Objects bei weitem weniger als dort eine Veränderung in der Grösse der Zerstreuungskreise bewirkt. So wird, wenn das Auge für unendliche Ferne, d. h. für parallele Strahlen eingestellt ist, die deutliche Wahrnehmung eines leuchtenden Punktes, der weiter als 65 Meter vom Auge entfernt liegt, noch keine Veränderung des letzteren erfordern. Erst bei einem Abstande von 65^{m} bildet sich ein Zerstreuungskreis, dessen Durchmesser nur 0,0011^{mm} beträgt, wobei der Vereinigungspunkt der Strahlen nur um 0,005^{mm} aus dem in der Netzhaut gelegenen Brennpunkte herausgerückt ist. Allmälig aber, je näher bereits das Object dem Auge steht, wächst die Grösse der Zerstreuungskreise immer bedeutender, und zwar

schon für verhältnissmässig geringe Verschiebungen desselben, während zugleich auch der Vereinigungspunkt beträchtlich weiter von der Netzhaut zurücktritt; daher denn auch die Accommodationsveränderung des Auges zur Beseitigung der störenden Zerstreuungskreise, d. h. zum deutlichen Sehen, immer dringlicher wird.

171. Da man, seit Helmholtz den Augenspiegel construirt, im Stande ist, die Bilder auf der Retina eines lebenden Menschen selbst wahrzunehmen, hat sich auch Gelegenheit geboten, einige der bereits auf dioptrischem Wege festgestellten Gesetze direct zu bestätigen.

Nachdem Kepler*) die Netzhaut als die Fläche bezeichnet hatte, auf welche die durch die optischen Medien des Auges erzeugten Bilder der äusseren Objecte fallen müssten, stellte Scheiner**) hierauf bezügliche Versuche an Augen von Ochsen und Schafen an, so wie auch an einem menschlichen Auge, indem er die hinteren Häute zum Theil ablöste und verdünnte, und in einiger Entfernung vor der durchsichtigen Hornhaut einen hellen Gegenstand brachte. Man bemerkte dann im Augengrunde, als man von hinten durch die verdünnten Stellen sah, ein kleines verkehrtes Bild von derselben Farbe, welche der Gegenstand hatte. Seitdem hat man sich oft genug von der Existenz und verkehrten Lage der Netzhautbilder überzeugt, wobei man vorzugsweise Augen von weissen Kaninchen benutzte, weil denselben das schwarze Pigment fehlt und der hintere Theil der harten Haut hier von selbst durchscheinend ist, so dass man die Bilder, die sich von äusseren Objecten auf der Retina darstellen, ohne Weiteres wahrnehmen kann. Wichtiger als diese Wahrnehmungen sind jedoch die mittelst des Augenspiegels an der Retina lebender Menschen geworden. Abgesehen hier von dem Werthe, den dieses Instrument für die Augenheilkunde besitzt, kann man mittelst desselben zunächst die theoretischen Folgerungen bestätigen, dass nämlich das deutliche Sehen eines Objects ein deutliches Bild desselben auf der Retina erfordert, und dass zur deutlichen Wahrnehmung ungleich entfernter Objecte eine Accommodationsveränderung in dem angegebenen

---

*) Paralipomena ad Vitellionem. Frankf. 1604. cap. 5. Diopt. prop. 60.

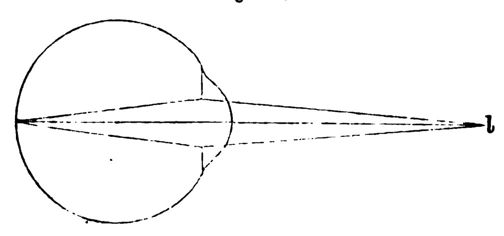
**) Oculus, sive fundamentum opticum, in quo radius visualis eruitur, sive visioni in oculo sedes decernitur, et anguli visorii ingenium reperitur. Lond. 1652. p. 176 ff.



Sinne nothwendig ist. So gewahrt man, wenn man mit dem Augenspiegel das Auge eines Menschen beobachtet, in dem Moment, wo dasselbe ein Object fixirt, vom letzteren ein deutliches Bild auf der Retina, während hier die zugleich vorhandenen Bilder anderer Objecte, je nach ihrer Entfernung, mehr oder weniger verwaschen, d. h. in Zerstreuungskreisen, erscheinen. Sobald und so lange der Beobachter mit Hilfe des Spiegels ein deutliches Bild eines leuchtenden Objects auf der Retina des beobachteten Auges wahrnimmt, sobald und so lange sieht auch dieses letztere den Gegenstand deutlich.

172. Der von Helmholtz *) construirte Augenspiegel beruht nun auf einem Princip, das sich geltend macht bei Erwägung des Factums, dass uns der Hintergrund eines beobachteten Auges unter gewöhnlichen Umständen völlig dunkel erscheint, obschon keineswegs alles Licht, welches von aussen in das Auge dringt, von Seiten des schwarzen Pigments absorbirt, sondern ein nicht unbedeutender Theil desselben von der Retina und Chorioidea reflectirt wird. Die Ursache, welche uns den Augengrund dunkel erscheinen lässt, liegt einfach darin, dass die von einem leuchtenden Punkte l auf der Retina vereinigten Strahlen durch die optischen

Fig. 125.



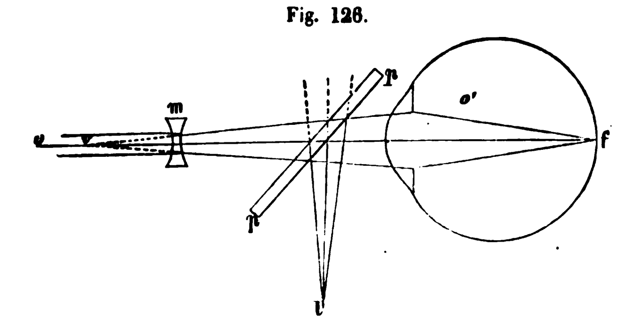
Medien des Auges in derselben Richtung wieder zu dem Punkte zurückkehren, von dem sie herkamen. Blickt man selbst in das Auge eines anderen, so entsteht ein Bild unseres Gesichtes, namentlich unseres Auges und seiner Pupille, auf der Retina des beobachteten Auges, während vom letzteren der grösste Theil des sonst zu ihm hingehenden Lichtes durch unseren Kopf abgehalten wird. In diesem Falle könnten nun Lichtstrahlen von denjenigen Theilen der Retina, auf welche das Bild unserer Pupille fällt, zu der letzteren zurückkehren. Allein unsere Pupille ist kein leuch-

*) Beschreibung eines Augenspiegels, Berlin 1851.

tendes Object, und so werden auch von ihren Bildpunkten auf der Retina des anderen Auges keine Lichtstrahlen zurückkommen; daher uns die Pupille dieses Auges schwarz erscheinen muss. Die Pupille der Albinos erscheint uns aber roth, weil die Sclerotica und auch die Iris bei denselben sehr durchscheinend ist, und deshalb ziemlich viel Licht diffus auf die Retina fällt. Bedeckt man jedoch, nach Donders, das ganze Auge mit einem undurchsichtigen Schirm, der nur mit einer der Pupille entsprechenden Oeffnung versehen ist, durch welche allein Licht in das Auge gelangen kann; so erscheint auch hier die Pupille (eines Albinos) fast ganz schwarz. In geringerem Grade können auch bei einem gewöhnlichen Auge, weil seine Sclerotica für das Licht einigermassen durchdringlich ist und von den erleuchteten Theilen der Netzhaut diffuses Licht auf die übrigen fällt, einige Lichtstrahlen in unsere Pupille dringen. Und dies geschieht besonders dann, wenn das beobachtete Auge sich mangelhaft adaptirt hat, so dass kein scharfes, dunkles Bild unserer Pupille auf der Retina desselben entstehen kann.

173. Der Augenspiegel gewährt nun ein Mittel, von der Netzhaut eines beobachteten Auges dergestalt Licht in unser eigenes fallen zu lassen, dass wir das Bild eines äusseren Objects auf derselben deutlich wahrnehmen können. Der Helmholtz'sche Augenspiegel vollbringt dies in folgender einfachen Weise. Zwischen beiden Augen, dem beobachtenden *o* und dem beobachteten *o'*, ist in geneigter Lage eine durchsichtige Glasplatte *pp* angebracht, auf welche eine Lichtquelle in *l* Strahlen sendet, die zum Theil

Fig. 126.



durch die Platte hindurchgehen, zum Theil aber auch nach dem Auge *o'* reflectirt und auf der Retina desselben vereinigt werden. Diese Strahlen gehen nun von ihrem Vereinigungspunkte *f* durch

die optischen Medien des Auges *o'* auf demselben Wege, auf dem sie kommen, zu der Platte *pp* zurück; hier wird ein Theil von ihnen nach der Lichtquelle *l* reflectirt, während der andere Theil durch die Glasplatte hindurchgeht und sich im Punkte *v* zu vereinigen strebt. Befindet sich nun das beobachtende Auge *o* in der Richtung des vom Auge *o'* kommenden Strahlenkegels, so werden die Strahlen convergirend in das erstere eindringen und bei gewöhnlicher Beschaffenheit desselben nicht auf seiner Retina vereinigt werden, da die meisten Augen sich wohl für parallele und divergirende, nicht aber für convergirende Strahlen einzurichten verstehen. Dieserhalb bringt man noch eine Zerstreuungslinse *m* vor das Auge *o*, wodurch die convergirenden Strahlen parallel oder divergirend gemacht werden, so dass sie jetzt in gewöhnlicher Weise durch Brechung in den optischen Medien des Auges *o* auf dessen Retina zu einem Bildpunkte vereinigt werden können.

Gesetzt nun, in *l* befinde sich eine Lichtflamme; dann wird der Beobachter in *o* das Bild derselben auf der Retina des Auges *o'* wahrnehmen, und zwar ganz deutlich, wenn sich das beobachtete Auge für die Entfernung des Spiegelbildes der Flamme adaptirt hat. Aber auch vergrössert wird man das Retinabild im Auge *o'* wahrnehmen, weil das convexe Linsensystem, welches die Medien dieses Auges darstellen, eine vergrössernde Wirkung ausüben. Die erforderte richtige Lage des Spiegelbildes von Seiten der Glasplatte *pp* ergibt sich daraus, dass das beobachtete Auge *o'* die Pupille des Beobachters *o* und das Spiegelbild der Flamme in derselben Richtung wahrnehmen muss.

Statt der einfachen Glasplatte lässt sich zweckmässig ein System von parallelen, dicht aufeinander liegenden Glasplatten benutzen, welches man zwischen beiden Augen unter einem gewissen Winkel aufstellt, so dass von ihm das Licht, um in das beobachtete Auge zu gelangen, ungefähr unter einem Winkel von 56° reflectirt wird. Die von dem Glas reflectirten Strahlen befinden sich dann in einem bestimmten Polarisationszustande (Abthl. 1, §. 95 ff.), der auch dem von der Hornhaut regelmässig reflectirten Lichte eigen ist. Dieses Licht wird nun, insofern es in der Einfallsebene polarisirt ist, bei der Brechung im Glase bedeutend geschwächt, während das von der Netzhaut diffus reflectirte Licht als unpolarisirtes bei seinem Durchgange durch das Glas keine sonderliche Schwächung erfährt. Auf solche Weise wird

die Störung, die das von der Hornhaut gespiegelte Licht verursachen könnte, grossentheils beseitigt.

Die Zerstreuungslinse *m* muss, um ein deutliches Retinabild wahrzunehmen, dem Brechungszustande beider Augen angemessen sein. Daher hat der Mechanicus Rekoss in Königsberg, der nach Helmholtz' Angabe den Augenspiegel verfertigte, zwei um ihre Axen drehbare Scheiben, von denen jede sechs Linsen trägt, so am Spiegel angebracht, dass man dieselben durch einfaches Drehen der Scheiben vor das beobachtende Auge bringen kann.

174. Dieser Augenspiegel hat seit seiner Herstellung mancherlei Modificationen erfahren, und es fehlt auch nicht an derartigen Instrumenten, die nach anderen Methoden construirt sind.

Der einfachste Augenspiegel, den Helmholtz selbst nach der Construction des vorherigen beschrieben, beruht auf einem Umstande, unter welchem schon früher Brücke*) ein Leuchten des menschlichen Auges beobachtet hatte. Wenn sich nämlich das Auge für einen Lichtpunkt adaptirt, entsteht ein deutlicher Bildpunkt desselben auf der Retina; rückt aber jener Punkt dem Auge, während dieses seinen Accommodationszustand beibehält, näher, so bildet sich auf der Retina ein Zerstreuungskreis. Gesetzt nun: das beobachtende Auge nimmt eine solche Stellung, dass es einen Theil der Strahlen, die von dem Zerstreuungskreise auf der Retina des beobachteten Auges herkommen, in sich aufnehmen kann, dann wird dasselbe den Hintergrund dieses Auges erleuchtet sehen. Demgemäss bringt man eine Kerzenflamme, durch einen Schirm bedeckt, zwischen beide Augen und sieht so dicht als möglich an dem Rande der Kerze und des Schirmes, der die directen Strahlen vom eigenen Auge abhält, vorbei in das zu beobachtende Auge, während man vor das letztere noch eine Convexlinse hält, welche die einfallenden Strahlen convergirend und das Auge weitsichtiger macht, und auch einen grösseren Zerstreuungskreis entstehen lässt, durch welchen der beobachtete Netzhauttheil stärker erleuchtet wird. Die von diesem Zerstreuungskreise kommenden Strahlen werden aber durch die Convexlinse zwischen ihr und dem beobachtenden Auge zu einem vergrösserten Bilde vereinigt, welches dem Beobachter, nachdem er sein Auge für die Entfernung

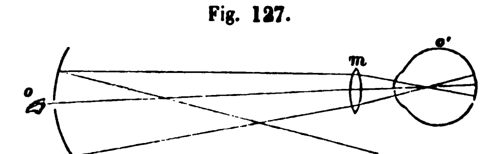
*) Müller's Archiv etc. 1845, S. 387 und 1847, S. 225.

desselben adaptirt, auch ein Bild des erleuchteten Netzhautareals gewährt.

Obgleich dieser Versuch sehr einfach erscheint, erfordert er doch mehr Uebung als der Gebrauch des oben beschriebenen Augenspiegels, wozu noch kommt, dass er nicht wie dieser zu Beobachtungen über die Accommodationsveränderungen des Auges benutzt werden kann.

Ein von Ruete*) construirter Augenspiegel enthält einen in der Mitte durchbrochenen Hohlspiegel, der die von der Lichtquelle

Fig. 127.



l kommenden Strahlen nach einer Linse *m* reflectirt, durch welche sie convergirend in das zu untersuchende Auge *o'* eindringen und dessen Netzhaut in einem grossen Zerstreuungskreise erleuchten. Von hier kehren dann die Strahlen parallel oder etwas convergirend auf die Linse zurück, die sie zu einem umgekehrten Bilde der Netzhaut zwischen der letzteren und dem beobachtenden Auge *o* vereinigt, so dass der Beobachter dasselbe durch die Oeffnung des Hohlspiegels wahrnimmt. Durch eine zweite in der Nähe der Spiegelöffnung angebrachte Convexlinse lässt sich dieses Bild bedeutend vergrössern, während die Anwendung einer Concavlinse eine schwache Vergrösserung ohne Umkehrung des Bildes gewährt.

Ausserdem sind noch verschiedene andere Augenspiegel construirt, so unter anderen von Epkens (nach Angaben von Donders verbessert) und von Coccius, dessen Instrument, von Zehender mit einer Verbesserung versehen, wegen seiner Wohlfeilheit und bequemen Brauchbarkeit für Augenärzte empfohlen wird.**)

---

*) Der Augenspiegel und das Optometer, Göttingen 1852.

**) Bezüglich der weiteren Theorie des Augenspiegels ist die bereits citirte Schrift von Helmholtz zu vergleichen, und über verschiedene andere derartige Instrumente findet man unter anderem Mehreres in: Der Augenspiegel, seine Anwendungen und Modificationen etc. Nach dem Holländischen des Dr. van Trigt von Schauenburg, Lahr 1859. — Ueber die Construction sog. heterocentrischer Augenspiegel und deren Anwendung s. Burow in Gräfe's Archiv für Ophthalmologie, Bd. III. Abth. II. S. 68.

175. Nachdem wir uns von der Nothwendigkeit und Existenz einer Accommodation des Auges überzeugt haben, wollen wir nun die Art und Weise der Accommodation selbst in Betracht ziehen. Wir wissen, dass der Vereinigungspunkt der Strahlen, die von einem dem Auge immer näher rückenden Lichtpunkte kommen, immer weiter hinter die Retina fällt. Soll dies vermieden, d. h. ein möglichst deutliches Bild auf der Retina selbst bewirkt werden, so ist eine innere Veränderung des Auges von der Art erforderlich, dass der Vereinigungspunkt der betreffenden Strahlen auf der Retina bleibt. Dies könnte bei constantem Brechungsapparate des Auges durch eine veränderliche Lage der Retina geschehen, und zwar in dem so eben hervorgehobenen Falle, der die Accommodation für die Nähe betrifft, durch eine grössere Entfernung der Retina von dem Brechungsapparate, insbesondere von der Linse. Weil jedoch der Retina allein eine solche Lagenveränderung nicht zukommt, könnte diese letztere nur durch eine Gestaltveränderung des ganzen Augapfels, in Folge einer seitlichen Compression desselben, herbeigeführt werden, so dass die Längenaxe der Augenhöhle vergrössert und demgemäss auch eine grössere Entfernung der Retina von der Linse bewirkt würde. Umgekehrt könnte durch einen Druck, der senkrecht auf dem zuvorgedachten stände, die Augenaxe verkürzt, also die Retina der Linse genähert und dadurch das Auge zum Sehen in die Ferne eingerichtet werden, wo dann natürlich das Nachlassen dieses Druckes eine Verlängerung der Augenhöhle und somit bis zu einem gewissen Grade eine Adaption für die Nähe bewirken würde. — Man hat in der That versucht, derartige Accommodationsveränderungen durch eine Thätigkeit der äusseren Augenmuskeln zu erklären. Ausgehend von dem Gedanken, dass die Accommodation für die näheren Objecte auf einem Zurückweichen der Retina und einem Vorrücken der Linse, also auf einer Verlängerung der Axe des Glaskörpers beruhe, nahm man an, dass diese Verlängerung hervorgebracht werde durch eine auf den äquatorialen Umfang des Augapfels ausgeübte Zusammendrückung, welche beide schiefe Muskeln im Verein mit den beiden geraden Musc. internus und Musc. externus mittelst gleichzeitiger Contraction bewirken sollten*), womit denn auch ein Convexerwerden der Hornhaut in Verbindung stehen würde.

*) s. Listing in R. Wagner's Handwört. der Physiol. Bd. IV, S. 501.

Indessen hat man sehr triftige Gründe gegen eine Thätigkeit der Augenmuskeln zu dem letzten Zwecke vorgebracht; und man kann es als ausgemacht ansehen, dass bei der Adaption für nahe Objecte keine Verlängerung der Augenaxe und auch keine Krümmungsveränderung der Hornhaut stattfindet, die man früher und häufig sogar noch in neuerer Zeit zum Behufe der Accommodation in Anspruch nahm.. Die Accommodation für die Nähe erforderte, wollte man sie von der Hornhaut abhängig machen, eine Verkleinerung ihres Krümmungshalbmessers, damit der Vereinigungspunkt der Lichtstrahlen, der bei nahen Objecten hinter die Retina fallen würde, nun in Folge einer stärkeren Brechung dieser Strahlen nach vorn, d. h. auf die Retina selbst, gerückt werde. Doch hat man schon längst gegen eine Krümmungsveränderung der Hornhaut den Einwand erhoben*), dass das durch Reflexion von der Hornhaut bewirkte Bild eines Objects seine Grösse nicht ändert, wenn das Auge successiv zwei Punkte betrachtet, von denen der eine sehr fern und der andere sehr nahe ist; gleichwohl müsste eine Grössenveränderung dieses Reflexbildes eintreten, falls die Hornhaut wirklich ihre Krümmung änderte. Einen anderen Einwand gegen diese Art der Accommodation ergab sich aus folgendem Versuche. Eine mit einer biconvexen Linse verschlossene Röhre ist mit Wasser gefüllt, dessen Brechungsvermögen dem der wässerigen Feuchtigkeit im Auge fast ganz gleich ist. Man bringt diese Röhre nahe vor das Auge und es findet sich, dass dasselbe noch die Fähigkeit besitzt, ungleich entfernte Gegenstände nacheinander mit gleicher Deutlichkeit zu sehen, woraus sich entnehmen lässt, dass eine Veränderung der Hornhautkrümmung zum Behufe der Accommodation nicht erforderlich ist. Wohl entscheidend aber in dieser Beziehung ist der Umstand, dass Helmholtz**), als er das Spiegelbild der Cornea mit Hilfe des Ophthalmometers (§. 145) genauer untersuchte, nicht die geringste Hindeutung auf eine der Accommodation entsprechende Veränderung des Krümmungshalbmessers der Hornhaut wahrnehmen konnte.

176. Schliessen wir sonach die Hornhaut, als bei dem Accommodationsprocesse nicht betheiligt, aus, so bietet sich unter

*) s. unter anderen: Lamé, Cours de Physique, deutsch von Schnuse, Darmstadt 1838, II. Bd. S. 215; — auch Senff bei Volkmann in R. Wagner's Handw. der Physiol. Bd. III. Abth. 1. S. 302.

**) Gräfe's Archiv für Ophthalm. Bd. I. Abthl. II.

den brechenden Medien des Auges noch die Krystalllinse dar, die entweder in Folge einer Verschiebung oder einer Gestaltveränderung der Accommodation dienen könnte. Abgesehen zunächst von einer Gestaltveränderung der Linse müsste die letztere bei der Accommodation für die Nähe nach vorn gegen die Hornhaut hinrücken, also die Axe des Glaskörpers sich verlängern, um den Vereinigungspunkt der Strahlen auf die Retina zu bringen. Als Beleg hierfür benutzte man eine Beobachtung von Hueck*), nach welcher der Linsenscheitel während der Einrichtung für die Nähe der Hornhaut sich nähert; denn man sieht bei Betrachtung des sich für die Nähe adaptirenden Auges im Profil, dass der Pupillenrand der Iris nach vorn gerückt wird. Allein eine wirkliche Ortsveränderung der Linse hat man doch nicht beobachtet, obwohl dieselbe, um den erfahrungsmässig festgestellten Accommodationsveränderungen Genüge zu leisten, sich bis zur Berührung mit der Hornhaut erstrecken und deshalb sichtbar sein müsste. Dagegen sind Cramer**) und Helmholtz, voneinander unabhängig, zu dem sicheren Resultate gelangt, dass die Accommodation für die Nähe nicht durch eine Orts-, sondern durch eine Formveränderung der Linse bedingt ist, indem der Krümmungshalbmesser der beiden Linsenflächen, insbesondere der vorderen Fläche, kleiner, also die Convexität der Linse grösser wird. Die Feststellung dieses Resultats geschah durch Beobachtung der Spiegelbilder, welche die vordere und hintere Linsenfläche von einem leuchtenden Objecte geben. Cramer untersuchte die Spiegelbilder einer Flamme bei zehn- bis zwanzigfacher Vergrösserung, während das betreffende Auge ohne Richtungsänderung sich abwechselnd für einen möglichst fernen und nahen Punkt adaptirte. Bei der Adaption für die Nähe veränderte nun das von der vorderen Linsenfläche gespiegelte Bild nicht blos seine Lage, sondern auch seine Grösse, was nur in einer Krümmungsveränderung der reflectirenden Fläche seinen Grund haben konnte. Der Halbmesser dieser Fläche musste, weil das Spiegelbild in Folge der Accommodation kleiner geworden war, abgenommen, mithin die Convexität dieser Fläche zugenommen haben. Da aber das Reflexbild der hinteren Linsenfläche der

*) Die Bewegung der Krystalllinse, Leipzig 1841.

**) Das Accommodationsvermögen des Auges. Nach Cramer und Donders, deutsch von Schauenburg, Lahr 1854.

Wahrnehmung Cramer's keine derartige Veränderung darbot, so schloss er hieraus auf eine unveränderte Lage und Gestalt dieser Fläche während der Accommodation.

177. Am genauesten wurden die Veränderungen dieser Spiegelbilder bei der Accommodation und die aus ihnen zu entnehmenden Formveränderungen der Linse von Helmholtz mittelst des Ophthalmometers gemessen. Als gespiegeltes Object benutzte derselbe zwei übereinander befindliche leuchtende Punkte, nämlich zwei Löcher in einem Schirme, der vor einer Lampenflamme aufgestellt war. Mittelst des Ophthalmometers liess sich mit Genauigkeit die Grösse des Reflexbildes der vorderen Linsenfläche messen, und zwar sowohl beim Sehen in die Ferne als beim Sehen in die Nähe. Und aus der gemessenen Grösse des Reflexbildes konnte man den Halbmesser der Linsenfläche für beide Fälle berechnen. So fand sich, dass die Grösse des Krümmungshalbmessers der vorderen Linsenfläche für ein dem Versuche unterworfenes Auge bei dessen Adaption für die Nähe von 11,9 Millimeter auf 8,6 Millimeter und für ein anderes von 8,8 Millimeter auf 5,9 Millimeter abnahm. Bei der Adaption für die Nähe ist also der Halbmesser der vorderen Linsenfläche kleiner, d. h. ihre Krümmung grösser.

In ähnlicher Weise wurde auch mit Berücksichtigung der Dicke und des Brechungsexponenten der Linse das Spiegelbild der hinteren Linsenfläche benutzt, um aus seiner Grössenänderung auf eine Krümmungsveränderung dieser Fläche zu schliessen. Die Messung zeigte hier, dass bei der Accommodation für die Nähe auch das Reflexbild der hinteren Linsenfläche kleiner wird, dass also auch der Halbmesser der letzteren eine Verkleinerung, sie selbst, die Fläche, mithin eine stärkere Wölbung erfährt, wobei jedoch der hintere Linsenscheitel an seinem Orte bleibt. Der vordere Scheitel liegt aber beim Nahesehen der Hornhaut näher als beim Fernsehen; die Dicke der Linse ist daher in jenem Falle grösser, während ihr Totalvolumen doch unverändert bleibt, da sie nach der auf ihrer Dicke senkrechten Dimension in entsprechender Weise dünner wird.

So geschieht also die Accommodation des Auges für verschiedene Entfernungen durch eine Formveränderung des brechenden Systems, nämlich durch eine Krümmungsänderung der beiden Linsenflächen in der Weise, dass dieses System bei der Accommodation für die Nähe stärker brechend wird und demgemäss eine kürzere

Brennweite erhält, während die lichtpercipirende Fläche der Retina keine Ortsveränderung erleidet.

178. Es folgt nun aus Vorstehendem sofort, dass die früher besprochenen optischen Constanten und Cardinalpunkte des Auges vermöge der Accommodation für verschiedene Entfernungen eine bestimmte Veränderung erfahren müssen; und gewiss war es von Interesse, mittelst der gefundenen Werthe, welche die Veränderungen der Linse bei der Accommodation des Auges für die Ferne und Nähe ausdrücken, die optischen Constanten und Cardinalpunkte desselben in Hinsicht auf diese beiden Accommodationszustände zu berechnen. Helmholtz führte diese Rechnung aus und legt derselben das schematische Auge (Listings) zum Grunde, jedoch mit einigen Modificationen, zu denen Beobachtungen am lebenden Auge geführt hatten. Die Resultate der Rechnung gibt nachstehende Tabelle, worin der Ort eines Punktes durch seine Entfernung vom Hornhautscheitel bestimmt ist. Die Längen sind in Millimetern ausgedrückt.

Gegeben.	Accommodation für die Ferne.	Accommodation für die Nähe.
Krümmungshalbmesser der Hornhaut	8,0	8,0
„ der vorderen Linsenfläche	10,0	6,0
„ der hinteren Linsenfläche	6,0	5,5
Ort der vorderen Linsenfläche . . .	3,6	3,2
„ „ hinteren „ . . .	7,2	7,2
Berechnet.		
Vordere Brennweite der Hornhaut .	23,692	23,692
Hintere „ „ „ .	31,692	31,692
Brennweite der Linse	43,707	33,785
Abstand des vorderen Hauptpunktes der Linse von ihrer vorderen Fläche	2,1073	1,9745
Abstand des hinteren Hauptpunktes der Linse von der hinteren Fläche .	1,2644	1,8100
Abstand der beiden Hauptpunkte der Linse voneinander	0,2283	0,2155
Hintere Brennweite des Auges . .	19,875	17,756

Berechnet.	Accommodation für die Ferne.	Accommodation für die Nähe.
Vordere Brennweite des Auges	14,858	13,274
Ort des vorderen Brennpunktes	—12,918	—11,241
„ „ ersten Hauptpunktes	1,9403	2,0330
„ „ zweiten Hauptpunktes	2,3563	2,4919
„ „ ersten Knotenpunktes	6,957	6,515
„ „ zweiten Knotenpunktes	7,373	6,974
„ „ hinteren Brennpunktes	22,231	20,248

Diese Rechnungsresultate rechtfertigen den Schluss, dass die Veränderungen, welche das Auge beim Uebergange aus dem Fernsehen zu dem Nahesehen thatsächlich erfährt, ausreichend sind, um nacheinander deutliche Bilder der in der Ferne und Nähe gesehenen Objecte auf der Retina eines normalen Auges zu bewirken. So findet sich, dass das Auge, wenn es für die Ferne adaptirt parallele Strahlen auf der hinteren Brennebene, d. h. auf der Retina vereinigen kann, bei nachheriger Accommodation für die Nähe das Bild eines 130^{mm} von der Hornhaut entfernten Objects gleichfalls auf der Retina zur Darstellung bringen wird.

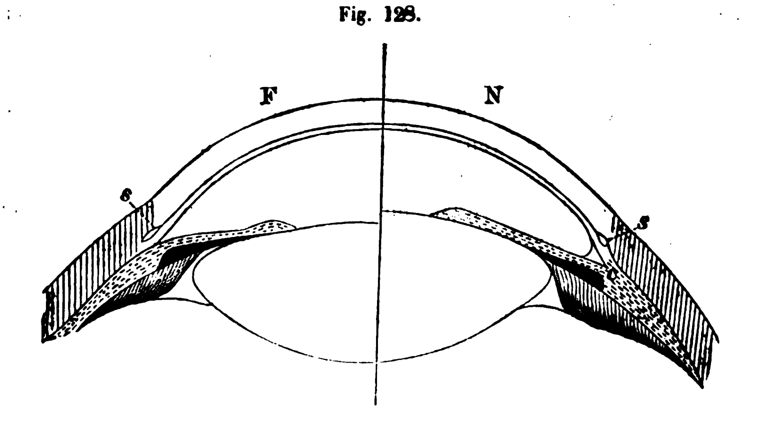
179. Während bei der Accommodation für die Nähe die hintere und vordere Linsenfläche sich stärker wölben und der Scheitel der letzteren nach vorn rückt, wird die Pupille enger: der Pupillenrand der Iris rückt nach vorn und ihre Peripherie zieht sich nach hinten. An diesem Vorrücken des Pupillenrandes lässt sich, wie Helmholtz gezeigt, das Vorrücken des vorderen Linsenscheitels erkennen. Das Vortreten der Pupille beim Nahesehen kann man aber leicht an einem Auge bemerken, das man von der Seite und etwas von hinten her beobachtet. Fixirt dasselbe einen fernen Gegenstand, so gewahrt man in dem Moment, worin das Auge ohne sonstige Verrückung zur Fixation eines nahen Objects übergeht, ein Hervortreten der ganzen Pupille und wohl auch noch eines Theiles des dem Beobachter zugekehrten Irisrandes. Auch das Zurückweichen des peripherischen Randes der Iris lässt sich nach Helmholtz direct durch einen Versuch darthun. Fällt nämlich von der Seite her Licht auf das Auge dergestalt, dass die Iris grösstentheils beschattet ist, so bildet die Hornhautfläche auf der dem Lichte entgegenstehenden Seite einen gekrümmten hellen

Streifen, eine sog. Brennlinie, die sich bei Accommodation für die Nähe dem äusseren Rande der Iris nähert und bei der Accommodation für die Ferne von demselben entfernt. Doch folgt schon aus dem Vorrücken des Pupillenrandes gewissermassen mit Nothwendigkeit ein Zurückweichen des peripherischen Randes der Iris, da das Volumen der vorderen Augenkammer constant bleiben muss, insofern nämlich die Gestalt der Hornhaut bei der Accommodation nicht verändert wird, die Linse am Pupillenrand der Iris anliegt und die wässerige Feuchtigkeit hier nicht als compressibel anzusehen ist. Das Vorrücken des Pupillenrandes ist eine Folge der Zunahme der Linsenaxe und der grösseren Wölbung der Linsenfläche beim Nahesehen, nicht aber, wie Hueck glaubte, Folge einer Ortsveränderung der ganzen Linse in der Richtung nach der Hornhaut hin.

180. Die Veränderungen, welche das Auge bei der Adaption für die Nähe erfährt, sind also, nochmals zusammengefasst, folgende: 1) die Wölbung der vorderen Linsenfläche ist bei der Accommodation für die Nähe grösser als beim Sehen in die Ferne; 2) wölbt sich auch die hintere Linsenfläche bei der Adaption für die Nähe etwas stärker; 3) der vordere Linsenscheitel rückt bei der Adaption für die Nähe etwas nach vorn, während der hintere Linsenscheitel an seiner Stelle bleibt; 4) zugleich verengert sich die Pupille; 5) der Pupillenrand der Iris rückt nach vorn, und 6) die Peripherie der Iris zieht sich nach hinten zurück.

Zur Veranschaulichung dient nachstehende von Helmholtz gegebene Abbildung, worin die linke Hälfte *F* einen halben Durch-

Fig. 128.



schnitt der betreffenden Theile (Linse und Iris) beim Fernsehen, die rechte mit *N* bezeichnete einen halben Durchschnitt derselben Theile bei der Accommodation für die Nähe darstellt.

181. Durch die besprochenen Formveränderungen der Linse erklärt sich die Accommodation des Auges für die Nähe sehr wohl. Allein es bleibt noch die Frage zurück, durch welche Kräfte und auf welche Weise, d. h. durch welchen Mechanismus diese Formveränderungen der Linse bewirkt werden. Ungeachtet der desfallsigen sorgfältigen Bemühungen ist diese Frage noch keineswegs mit völliger Evidenz beantwortet. Gegen eine Thätigkeit der äusseren Augenmuskeln, der vier geraden und zwei schiefen, hat man sehr triftige Bedenken erhoben, wie wir denn auch schon bemerkt haben, dass eine etwaige Formveränderung des ganzen Augapfels durch die Thätigkeit der besagten Muskeln mit einer Formveränderung der Hornhaut verbunden sein würde, die positiven Beobachtungen zufolge bei der Adaption für die Nähe nicht statt hat. Auch verschiedene pathologische Erfahrungen stellen sich der Annahme entgegen, dass die Thätigkeit der äusseren Augenmuskeln ein sehr wesentlicher Factor im Mechanismus der Accommodation sei. So hat man Fälle beobachtet*), wo eine Lähmung des nervus oculomotorius, der die genannten Muskeln mit Ausnahme des musc. rect. extern. und musc. obliq. super. versorgt, keinen Einfluss auf die Accommodationsfähigkeit zeigte, während in anderen Fällen dasselbe Vermögen ungeachtet der freien Beweglichkeit der Augenmuskeln gänzlich fehlte oder doch sehr schwach erschien. Dagegen hält man es für wahrscheinlich, dass das Fasersystem der Iris zum Behufe der Accommodation wirksam werde. Durch gleichzeitige Erregung der circularen und radialen Irisfasern wird die Iris so afficirt, dass ihr peripherischer Rand nach hinten ausweicht, wodurch die peripherischen Randtheile der Linse einen stärkeren Druck erfahren, vermöge dessen die der Pupillenöffnung entsprechende Linsenfläche stärker hervorgewölbt werden muss. Die Rückkehr der Linse zu ihrer ursprünglichen Form geschieht aber nach Cramer**) lediglich durch die elastische Wirkung der

---

*) Gräfe's Archiv für Ophthalmologie, Bd. II. 2. S. 299; — s. auch ebenda bez. des Mechanismus der Accommod. Bd. I. 1. S. 315, Bd. II. 1. S. 187, und III. S. 95.

**) s. S. 273.

Linsenkapsel. In ganz gleicher Weise fasst auch Donders den Accommodationsmechanismus auf, nimmt indess noch hinzu, dass die Fasern des Ciliarmuskels (s. S. 242), indem sie sich contrahiren, den peripherischen Rand der Iris an die Wand des canalis Schlemmii (*s*, Fig. 128) nach hinten ziehen, wodurch der Druck auf den betreffenden Theil der Linse eine Begünstigung erfahren soll.

182. Diese Ansicht von Cramer und Donders erklärt jedoch nur die Vorwölbung der vorderen Linsenfläche, nicht aber, wie Helmholtz zeigt, die ganze Gestaltveränderung der Linse bei der Adaption für die Nähe. Nach Helmholtz kommt der zonula Zinnii während der Ruhe des Auges oder bei seiner Einstellung für die Ferne eine gewisse Spannung zu, die am Rande der Linse in radialer Richtung nach aussen thätig eine Abplattung der Linse bewirkt. Ziehen sich nun die Längsfasern des tensor chorioideae (musc. ciliaris) zusammen, wie es bei der Adaption für die Nähe der Fall ist, so wird die zonula erschlafft und der Glaskörper nach vorn gedrängt. Die weitere Folge hiervon ist aber die, dass die Linse, nun vom Drucke der zonula befreit, vermöge ihrer Elasticität sich verdickt, während der Druck des Glaskörpers gegen die tellerförmige Grube, nämlich gegen die hintere Fläche der Linse das Ausweichen der letzteren nach hinten nicht stattfinden lässt. Hierzu kann sich nun noch der Druck gesellen, welcher von Seiten der Iris durch die Contraction ihrer radialen und circularen Fasern auf die Linse ausgeübt wird und eine Vorwölbung ihrer vorderen Fläche veranlasst, während derselbe die Wölbung der hinteren Fläche wieder bis zu einem gewissen Grade vermindert, so dass der gewöhnliche Betrag dieser Wölbung nur wenig überschritten wird. Die Vorwölbung der vorderen Linsenfläche bedingt es aber, dass der Raum vor und hinter der Iris sein ursprüngliches Volumen bewahrt. Sieht man auf Figur 128, so bemerkt man, dass die Iris im Zustande der Ruhe oder bei Einstellung für die Ferne in der durch *s* bezeichneten Gegend ein Knie bildet, das sich bei der Adaption für die Nähe, indem sich die Fasern der Iris contrahiren, streckt (s. Fig. 128, rechts). Hierdurch wird einerseits der von Flüssigkeit erfüllte Raum enger und daher ein Theil der Flüssigkeit verdrängt, während andrerseits freier Raum entsteht. Wölbt sich nun die Linse vor, so wird der Raum vor und der Raum hinter der Iris sein ursprüngliches Volumen nicht ändern.



Einen nothwendigen Factor im Accommodationsmechanismus des Auges, nämlich in Rücksicht der Formveränderung der Linse, hat H. Müller*) in der eigenthümlichen Beschaffenheit des Ciliarmuskels darzuthun gesucht, und zwar so, dass die Linse durch diesen Muskel in Folge einer d i r e c t e n Compression ihres peripherischen Theils dicker werden soll.

181. Sodann hat man noch eine veränderte Blutvertheilung im Auge als bedeutsam für die Accommodation gehalten. So soll nach L. Fick**) vermöge einer Contractilität der Ciliarfortsätze das Blut aus diesen entweichen und unter dem allgemeinen Druck des arteriellen Blutes eben so viel Blut in die hinter der Linse gelegenen Gefässe der Chorioidea treten, wodurch dann ein Druck gegen die Linse ausgeübt und diese vorn hervorgewölbt werden müsse. Hiergegen hat man jedoch den Einwand erhoben, dass dabei eine Abflachung der hinteren Linsenfläche, wie es scheine, nicht zu vermeiden sei, was dem Thatbestande nicht entsprechen würde, da auch diese Fläche bei der Accommodation für die Nähe etwas stärker gewölbt wird. Nach Czermak***) werden umgekehrt die Ciliarfortsätze mit Blut überfüllt, so dass demzufolge die Linse vom Rande aus eine Compression erfahren soll. Die Bedeutung der Aderhaut für den Vorgang der Accommodation ergibt sich aber, nach Ludwig†), aus ihrer Lage zwischen den Muskeln, die direct oder durch den Glaskörper auf die Linse wirken, und diesen letzteren Gebilden selbst, auf welche sie den Muskeldruck, je nach dem Spannungs- und Füllungsgrade ihrer Gefässe, mehr oder minder vollständig überträgt.

Obgleich nun die festgestellten Formveränderungen der Linse genügen, um die Accommodation für die Nähe zu erklären, so lässt sich doch keineswegs mit Entschiedenheit behaupten, dass sie zu diesem Behufe das einzige und ausschliessliche Mittel sei. Es besteht vielmehr die Möglichkeit, dass nebenbei oder ausnahmsweise, wenn die normale Beschaffenheit des Auges gestört ist, noch ein anderer Mechanismus diese Accommodation zu bewirken vermag. Bedeutungsvoll in dieser Beziehung ist die Erfahrung, aber

*) Gräfe's Archiv für Ophthalmologie, Bd. III. 1.
**) Müller's Archiv. 1853. S. 449.
***) Prager Vierteljahrschrift, XI. Jahrg. 1854. Bd. III. S. 109.
†) Lehrbuch der Physiologie, Leipzig 1858, Bd. I. S. 276.

wie es scheint, auch nur sie, dass nach Entfernung der Linse noch eine Spur des in Rede stehenden Accommodationsvermögens zu bemerken ist.*) Man vermuthet, dass in diesem Falle die Accommodation ausnahmsweise durch eine von den äusseren Augenmuskeln bewirkte Formveränderung des Auges zu Stande kommen könne.

182. Es ist oben hervorgehoben, dass sich die Pupille mit der Accommodation für die Nähe verengert. Nun hat sich aber ergeben, dass eine Verminderung der Pupillenweite bei unveränderter Accommodation für die Ferne auch dann stattfindet, wenn die Convergenz der Sehaxen, wie beim Betrachten eines näheren Objects (mit beiden Augen), zunimmt; je mehr sich hierbei die Augenaxen nach innen richten, desto kleiner wird die Pupillenweite. Die Verengerung der Pupille geschieht hier durch Contraction des circularen Irismuskels, die mit der Contraction des von Seiten des nerv. oculomotorius erregten musculus rectus internus verbunden ist, durch welchen der Augapfel dergestalt bewegt wird, dass sich seine Axe mit der des anderen Auges auf dem fixirten Object kreuzt. Ob aber auch die Pupille mit wachsender Accommodation für die Nähe bei gleich gerichteter Augenaxe enger wird, ist sehr fraglich, obschon es von Vielen behauptet wird**). E. H. Weber***) sieht in der Verengerung der Pupille einen von der Accommodation unabhängigen Vorgang; sie ist nach ihm nur eine mit der Bewegung der Augen beim Betrachten naher Objecte associirte Bewegung, die auf die zuvor bezeichnete Weise bei der Vergrösserung des Convergenzwinkels der Augenaxen herbeigeführt wird; daher die Pupillenweite, wenn das Auge sich ohne Veränderung der Sehaxenconvergenz für die Nähe adaptirt, nicht kleiner wird. Für diese Ansicht Weber's führt Ludwig†) ein Beispiel an, indem er von einem Arzte Szontagh (in Wien) berichtet, dass derselbe (unter Mitwirkung der Halsmuskeln) die Pupille willkürlich erweitern und auch verengern könne. Derselbe accommodirte für seinen Nähepunkt gleich gut mit verschiedenen Pupillenweiten: von 3,9 bis 7,1^{mm} Durchmesser.

---

*) s. A. v. Gräfe im Archiv für Ophthalmologie, Bd. II. 1. S. 187.

**) s. Cramer u. Donders a. a. O.: das Accommodationsvermögen etc.; auch Ruiter: de actione Atropae Belladonnae in Iridem. Utrecht 1853.

***) De motu iridis, Lips. 1858.

†) a. a. O. S. 281 u. 286.

183. Sonst verengt sich die Pupille, wie wir schon bei einer anderen Gelegenheit erwähnt haben, wenn die Retina von intensivem Licht afficirt wird, während sie sich im entgegengesetzten Falle erweitert. Die Verengerung geschieht auf reflectorischem Wege, indem die Erregung des nervus opticus sich im Gehirn auf den nerv. oculomotorius, nämlich auf die zur Iris gehenden Fasern überträgt, so dass der Kreismuskel der Iris contrahirt und demzufolge die Pupille verengert wird. So geschieht es im Hellen, beim Sehen naher Objecte, und die Folge davon ist, dass ein kleinerer Strahlenkegel ins Auge dringt. Dagegen wird in der Dunkelheit und beim Sehen in die Ferne die Pupille weiter und damit zugleich einem grösseren Strahlenkegel der Eingang ins Auge gestattet. Aus dem Umstande aber, dass die Pupillen beider Augen im normalen Zustande stets einerlei Oeffnungen behaupten, und sogar dann, wenn die Pupille des einen durch einen Lichtreiz der Retina verengert wird, auch die Pupille des andern nicht gereizten Auges sich in gleichem Masse verengert, folgt, dass die Bewegungsnerven der circularen Irismuskeln im Gehirn ein gemeinsames Centrum haben, und zwar in der Weise, dass die von einem Auge herkommende Erregung des nerv. optic. sich im Gehirn (in den Vierhügeln) auf die dem nerv. oculomot. angehörigen Irisfasern beider Augen überträgt.

Wie mit der Verengerung der Pupille, verhält es sich auch mit ihrer Erweiterung in beiden Augen; ist sie für das eine Auge irgendwie bedingt, so erstreckt sie sich auch in demselben Masse auf das andere. Es ist erwiesen, dass das radiale Fasersystem der Iris, durch dessen Contraction die Erweiterung der Pupille geschieht, unter dem Einflusse des nerv. sympathicus steht; daher denn auch, wenn man den Stamm des Sympathicus am Halse reizt, die möglich grösste Erweiterung der Pupille stattfindet.*)

Beiläufig sei hier erwähnt, dass verschiedene Gifte in wässeriger Lösung (wie Aconit, Datura strammon., Opium, Digitalis und namentlich Atropin) durch Einwirkung auf den radialen Irismuskel eine andauernde Erweiterung der Pupille in dem Auge hervorbringen, mit dessen Conjunctiva sie in Berührung gebracht werden, während sie dem Blute mitgetheilt die Pupille beider Augen

*) Ueber verschiedenes Hierhergehörige s. auch Budge: die Bewegung der Iris; Braunschw. 1855.

erweitern. So ist es bei den Säugethieren und Amphibien, wogegen die Pupille der Vögel, deren Iris in gewisser Beziehung eine andere muskuläre Beschaffenheit hat, durch die genannten Gifte wenig oder gar nicht erweitert wird. Im Gegensatze zu diesen Giften bewirkt der Giftlattich (lactuca virosa) eine Verengerung der Pupille.

Endlich bewirken auch noch Veränderungen im Blutgehalte der Augengefässe Bewegungserscheinungen der Iris und demgemäss eine Veränderung der Pupillenweite. Wird der arterielle Blutstrom auf seinem Wege zum Kopfe durch Compression der art. anonyma und der Carotiden gehemmt, so entsteht zunächst eine Verengerung der Pupille und Lidspalte, nach einiger Zeit aber Erweiterung derselben. Wiederherstellung des Blutstromes während jener Verengerung veranlasst ein Hervortreten des Augapfels mit beträchtlicher Erweiterung der Pupille und Lidspalte*).

184. In unseren bisherigen Betrachtungen über die Adaptionsverhältnisse des Auges sind wir von der gewöhnlichen Annahme ausgegangen, dass das Auge im Zustande der Ruhe für die Ferne (oder seinen Fernpunkt) eingestellt sei, und daher auch nur die Einstellung für geringere Entfernungen eine positive innere Veränderung des Auges erfordere**). Als Stütze für diese Ansicht machte man geltend, dass das Auge nach längerem Verschluss plötzlich und unbefangen geöffnet für die Ferne eingestellt erscheine und das Fixiren des Fernpunktes gewissermassen eine unmittelbare Empfindung der Ruhe mit sich führe, während die Fixation eines näher gelegenen Punktes eine bemerkbare Anstrengung verursache, und endlich, dass die Reflexbilder der beiden Linsenflächen in ihrer gegenseitigen Stellung nur beim Sehen in die Nähe, nicht aber bei dem in die Ferne Abweichungen von der Stellung im Ruhezustande des Auges darböten. Dagegen hat Th. Weber***) nachzuweisen gesucht, dass das Auge im Zustande völliger Ruhe weder für den Fern- noch für den Nähepunkt, sondern für einen mittleren Abstand eingestellt sei, und dass demgemäss

*) s. hierüber Weiteres bei Kussmaul: Untersuch. über den Einfluss, welchen der Blutstrom auf die Bewegungen der Iris ausübt. Würzburg 1855.

**) s. Volkmann in R. Wagner's Handw. der Physiol. Art. Sehen, Bd. III. Abth. 1. S. 300 f.

***) Archiv für physiologische Heilkunde, 1855, Bd. XI. S. 479.

die Adaption sowohl für grössere als für geringere Entfernungen eine besondere Activität des Auges beanspruche. Nennt man nun die Accommodation für die Nähe die positive, so kann man mit Th. Weber die für grössere Entfernungen die negative Accommodation nennen. Dass die letztere auf einer besonderen Activität des Auges beruhe, sucht Weber zunächst durch Hindeutung auf das Gefühl der Anstrengung zu begründen, dessen man inne werde, wenn man entfernte Objecte scharf sehen wolle. Sodann wird hervorgehoben, dass das Auge, wenn es durch Sehen in die Ferne ermüdet sei, nicht mehr so weit als vorher sehen könne. Es ist dann nicht mehr im Stande, sich für die Entfernung des bisher scharf gesehenen Punktes gehörig zu accommodiren: nur Gegenstände, die in geringerer Entfernung liegen, vermag es noch deutlich zu sehen. Nun sollte das Auge, wenn dieser Zustand der Ermüdung seinem Ruhezustande entspricht und das Sehen in die Ferne keine besondere Activität desselben in Anspruch nimmt, gerade auf jenen Fernpunkt eingestellt sein, was jedoch nach dem Vorstehenden nicht der Fall ist. Indessen kann man fragen, ob der Zustand völliger Ermüdung, der nach anhaltendem Sehen in die Ferne eintritt, mit dem gewöhnlichen Ruhezustande des Auges ganz identificirt werden darf. Schon die längere Spannung der Aufmerksamkeit und fest eingehaltene Richtung des Blickes auf ein entferntes Object könnte vielleicht, selbst bei Abwesenheit irgend einer besonderen Accommodationsanstrengung, eine derartige Ermüdung (resp. Veränderung) des Auges herbeiführen, die ihm zunächst nicht mehr ein deutliches Sehen dieses Objects gestattet. Freilich: wenn man für ein Auge im Ruhezustande, der als solcher objectiv und subjectiv dargethan wäre, die fernste Grenze des deutlichen Sehens bestimmt hätte, und es zeigte sich nun, dass dieses Auge in Folge einer willkürlichen Anstrengung zum deutlichen Sehen in eine noch grössere Ferne fähig wäre; so würde dies allerdings für eine negative Accommodation im obigen Sinne sprechen. Zu Gunsten der letzteren führt Weber noch den Umstand an, dass sich die Fähigkeit des Auges, in grössere Fernen zu sehen, durch Uebung steigern lasse. Und endlich hat man auch noch an die Thatsache *) erinnert, dass ein durch Belladonna vergiftetes Auge, das der Accommodation fast voll-

*) s. Zehender in Gräfe's Archiv für Ophthalm. Bd. III. 2. 95.

ständig entbehrt, weder für die Nähe noch für die Ferne eingestellt sei.

Th. Weber hebt noch besonders hervor, dass die negative Accommodation bei manchen Augen in so hohem Grade vorhanden sei, dass dieselben sogar Lichtstrahlen, die nach einem Punkte hinter dem Auge convergiren, auf der Netzhaut vereinigen könnten.

185. Es ist nun, wie es scheint, kaum zu bezweifeln und auch bereits anerkannt, dass die negative Accommodation, also die active Einrichtung des Auges für grössere Entfernungen, auf einem anderen Mechanismus als die positive beruht. Mit Berücksichtigung der von v. Gräfe experimentell festgestellten Thatsache*), dass das Auge durch einen auf seinen Umfang ausgeübten Druck fernsichtiger wird, hat man daran gedacht, dass durch eine Wirkung der äusseren Augenmuskeln die Hornhaut abgeflacht, also schwächer brechend gemacht werde, und dass demzufolge die Vereinigungspunkte der von einem fernen Object kommenden Strahlen, die sich sonst vor der Retina vereinigen würden, mehr nach hinten, d. h. auf die Retina selbst verlegt werden müssten. Auch hat Helmholtz gezeigt, dass ein äusserer Druck auf das Auge, der sich auch auf dessen flüssigen Inhalt erstreckt, die Krümmung der Hornhaut darum vermindert, weil das gedrückte Auge nach der Kugelform strebt, und hierbei die einspringenden Winkel zwischen der Sclerotica und Hornhaut ausgeglichen werden. Sodann könnte noch ein Druck der Ciliarfortsätze auf die zonula vermittelst Abflachung der Linse zum Behufe der negativen Accommodation wirksam sein.

186. Nach einer Bemerkung im §. 167 bietet die deutliche Sehweite und die Entfernung ihrer Grenzpunkte von der Cornea sowohl bei Augen verschiedener Personen als auch nicht selten für beide Augen eines und desselben Individuums gewisse Verschiedenheiten dar. Anstrengende Thätigkeit des Auges kann, bestimmten Erfahrungen zufolge, eine mehr oder minder andauernde Veränderung der deutlichen Sehweite und eine Verschiebung des Nähepunktes zur Folge haben. Auch rückt der Nähepunkt um etliche Millimeter dem Auge näher, wenn man das Auge von aussen nach innen richtet**). Alles, was den Accommodationsmechanis-

*) s. auch Breton in Gazette medicale. Januar 1857.

**) s. H. Meyer in Henle's u. Pfeuffer's Zeitschr. f. rat. Med. Bd. V, S. 383.



mus irgendwie alterirt, kann hierher gehörige Veränderungen bewirken. So soll durch Belladonnasaft, der, wie man vermuthet, eine Lähmung der im betreffenden Accommodationsmechanismus thätigen Muskeln veranlasst, der Nähepunkt vom Auge entfernt werden.

Manche Augen sind so beschaffen, dass sie nur von nahen, nicht aber von fernen Gegenständen ein deutliches Bild geben; sie sind kurzsichtig (myopisch). Die Kurzsichtigkeit ist durch eine allzugrosse Nähe des Fernpunktes charakterisirt, so dass die Vereinigungspunkte der Strahlen, die von fernen Objecten kommen, vor die Retina fallen, während auf dieser selbst, indem die Strahlen von ihren Vereinigungspunkten aus wieder divergiren, statt scharfer Bilder der einzelnen Objectpunkte ineinandergreifende Zerstreuungskreise entstehen. Ursache der Kurzsichtigkeit kann eine zu grosse Convexität der Hornhaut und Krystalllinse sein. Dieselbe ist in manchen Fällen erblich; sehr häufig entsteht sie aber auch erst durch Missbrauch der Augen, durch zu anhaltendes Lesen kleiner Schrift, und durch die Gewohnheit, die Bücher beim Lesen und das Papier beim Schreiben zu nahe vor das Auge zu bringen. Und so ist sie oft nichts anderes als die mehr oder minder bedeutende Unfähigkeit des Auges, sich bequem für andere Entfernungen zu adaptiren, als diejenige, an welche man sich bei anhaltendem Lesen und Schreiben gewöhnt hat.

Das weit- oder fernsichtige Auge ist dadurch charakterisirt, dass bei ihm der Nähepunkt weiter entfernt liegt, als man gewöhnlich bei normalen Augen findet. Deshalb muss der Weitsichtige, wenn er lesen will, die Schrift in ungewöhnlich weiter Entfernung vom Auge halten. Der Grund der Weitsichtigkeit (Presbyopie) kann eine geringe Erhabenheit der Hornhaut und unzulängliche Convexität der Linse, und eine hierdurch veranlasste mangelhafte Accommodation für nähere, kleinere Objecte sein. Daher fallen die Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen von nahe gelegenen Objecten hinter die Netzhaut, so dass auf der letzteren auch hier statt scharfer Bilder der einzelnen Objectpunkte ineinandergreifende Zerstreuungskreise entstehen. Aber auch bei fast ganz normalen Augen kann eine mangelhafte Accommodation für nahe, kleine Objecte die Folge einer Angewöhnung sein. So kommt es nicht selten vor, dass Personen, die vermöge ihrer äusseren

Beschäftigungsweise auf das Erkennen weit entfernter Objecte angewiesen sind, kleine Gegenstände in der Nähe nicht deutlich zu sehen vermögen, während sie sonst sehr weit und scharf in die Ferne sehen.

Zu unterscheiden von der Fern- und Kurzsichtigkeit ist eine gewisse Gesichtsschwäche, die allerdings auch mit dem einen oder anderen dieser beiden Fehler verbunden auftreten kann. Sie besteht in einer baldigen Ermüdung des Auges, das wohl sonst auf kurze Zeit nahe und ferne Gegenstände nacheinander scharf zu erkennen vermag; aber bald erscheinen die Gegenstände wie verschleiert, und das fortgesetzte Sehen verursacht ein Gefühl der Anstrengung und Schmerz in der Umgebung des Auges.

187. Zur Hebung der Kurz- und Fernsichtigkeit benutzt man bekanntlich die Brillengläser, und zwar für Kurzsichtige concave, für Fernsichtige convexe Gläser; denn bei Kurzsichtigen müssen die von einem fernen Object kommenden Strahlen durch ihre Brechung in der vorgehaltenen concaven Linse so zerstreut werden, dass ihre Vereinigung nicht vor der Netzhaut, sondern auf derselben stattfindet, während bei einem weitsichtigen Auge die Strahlen, die sich erst hinter der Netzhaut vereinigen würden, durch die vorgehaltene convexe Linse so zusammengebrochen werden sollen, dass die Vereinigung derselben gleichfalls auf der Netzhaut geschieht.

Die Brennweite der concaven und convexen Linsengläser ist je nach dem Masse der Kurz- und Fernsichtigkeit besonders zu bestimmen, falls die Brille ihrem Zweck entsprechen soll. Will man die passende Brennweite berechnen, so ermittelt man zunächst den Abstand, worin das Auge ein Object, gewöhnlich eine Schrift von mittlerer Grösse, deutlich sehen kann; dann multiplicirt man diesen Abstand mit der Entfernung, in welche das Auge durch die Brille deutlich sehen soll, und dividirt das Product durch die Differenz der beiden genannten Entfernungen. Der Quotient gibt sofort die gesuchte Brennweite des Glases, die natürlich für ein kurzsichtiges Auge, dem eine concave Linse dient, negativ ist. Wir haben nämlich nach S. 50 u. 61 (Abth. 1) für eine Convexlinse die Formel $\frac{1}{e} - \frac{1}{e'} = \frac{1}{f}$, wo f die Brennweite der Linse, e die Entfernung des Objects und e' die Entfernung des durch die Linse erscheinenden Bildes bezeichnet. In Bezug auf unseren Fall ist



nun e die Entfernung, in welcher das fernsichtige Auge das Object deutlich sieht, und e' die Entfernung, für welche das Object dem betreffenden Auge durch die Convexlinse deutlich erscheinen soll. Aus der Formel ergibt sich aber die Brennweite dieser Linse: $f = \frac{ee'}{e - e'}$. Für ein kurzsichtiges Auge hat man in Hinsicht auf eine concave Linse mit Beibehaltung der nämlichen Bezeichnungen: $\frac{1}{e} - \frac{1}{e'} = -\frac{1}{f}$, und $-f = \frac{e'}{e' - e}$.

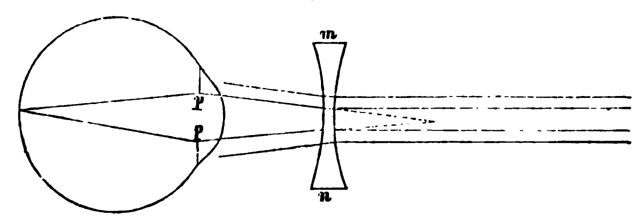
188. Eine Brille würde nun gewiss ihrem Zwecke vollkommen entsprechen, wenn sie das kurz- oder fernsichtige Auge befähigte, dasselbe wie ein normalsichtiges zu leisten. In dieser Beziehung hat A. Fick*) einige nähere Betrachtungen über die Wirkung der Brillengläser angestellt, wobei er, um einen festen Anknüpfungspunkt zu gewinnen, ein Auge normalsichtig nennt, wenn es im Zustande der Ruhe auf unendliche Ferne, d. h. für parallele Strahlen, eingestellt ist. Die Netzhaut fällt hier mit der hinteren Brennebene des Auges zusammen, und ein Auge lässt sich kurzsichtig nennen, wenn im Ruhestande seine Netzhaut hinter der Brennebene liegt, also parallele Strahlen vor derselben zur Vereinigung kommen, dagegen fernsichtig, wenn parallele Strahlen erst hinter der Netzhaut vereinigt werden. Es sind dies zwar, wie Fick selbst hervorhebt, nur willkürliche Nominaldefinitionen, allein die darauf bezogenen Betrachtungen lassen doch eine praktische Deutung zu.

Für den Gebrauch der Brillen besteht schon längst die bekannte Regel, die Gläser dem Auge möglichst nahe zu bringen. Dies ist für eine Concavlinse vollkommen richtig und folgt aus der Art und Weise, wie die Lichtstrahlen durch eine solche Linse gebrochen werden. Die Grösse und Lichtstärke des Netzhautbildes ist nämlich bedingt durch die Entfernung der Linse vom Auge; und zwar verkleinert eine Zerstreuungslinse das Netzhautbild, wenn sie nicht bis auf einen gegen ihre Brennweite verschwindend kleinen Abstand dem Auge genähert ist. Auch die Lichtstärke des Netzhautbildes wird durch eine Zerstreuungslinse vermindert, wie man sofort aus umstehender Figur erkennt. So wird ein Bündel paralleler Strahlen, das auf eine Concavlinse mn fällt, der-

*) Medicinische Physik, Braunschw. 1858. S. 301 ff.



Fig. 129.



artig gebrochen, dass die Grenzstrahlen nicht in die Pupille *pp* eindringen können. Daher wird ein kurzsichtiges Auge, welches mit einer Concavbrille bewaffnet ist, selbst bei gleicher Pupillenweite mit einem normalsichtigen nicht so viele Lichtstrahlen wie dieses bei der Erzeugung eines Bildes auf der Netzhaut vereinigen; die weiter nach aussen gelegenen Randstrahlen werden durch die Linse zerstreut, und auf undurchsichtige Theile des Auges geworfen. Und dies findet auch dann noch statt, wenn die Strahlen von einem näher gelegenen Object herkommen. Demnach wird das Netzhautbild eines kurzsichtigen Auges bei sonst gleicher Deutlichkeit lichtschwächer als das eines normalsichtigen von gleicher Pupillenweite sein, und zwar werden um so mehr Strahlen durch die vorgehaltene Linse abgehalten, je kürzer ihre Brennweite und je grösser ihre Entfernung vom Auge ist. Das Gegentheil gilt für die Convexbrille eines weitsichtigen Auges; durch eine Sammellinse wird das Netzhautbild grösser und lichtstärker, und es erscheint innerhalb gewisser Grenzen vortheilhaft, die Brille möglichst weit vom Auge zu appliciren.

189. Bei Vergleichung des Accommodationsvermögens kurz- und fernsichtiger Augen mit dem normalsichtiger fand Fick*), dass für ein kurzsichtiges Auge, wenn es gleich viel wie ein normalsichtiges leisten soll, eine desto grössere Accommodationsthätigkeit erforderlich ist, je näher sich demselben die Linse befindet, dagegen für ein fernsichtiges Auge eine desto grössere, je weiter die betreffende Linse vom Auge absteht. Unter einem normalsichtigen Auge ist hier mit Bezug auf das schematische ein solches verstanden, das im Ruhezustande auf unendliche Ferne und bei möglichster Anstrengung des positiven Accommodationsapparates auf eine Entfernung von 100 Millimeter eingestellt ist. Da es nun

---

*) a. a. O. S. 306 ff.

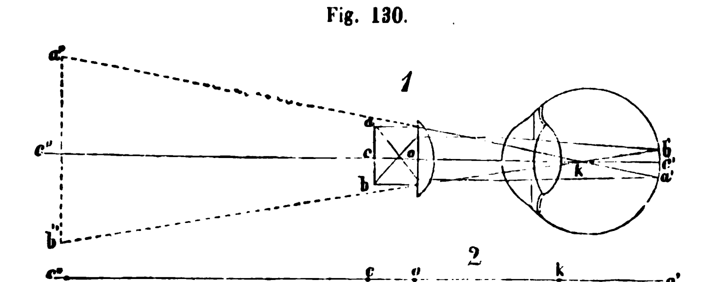
auf der anderen Seite für einen Kurzsichtigen von überwiegendem Vortheil ist, die Linse möglichst nahe an das Auge zu bringen, so erscheint es bei nicht ausreichendem Accommodationsvermögen nöthig, dass derselbe zum deutlichen Sehen in verschiedene Entfernungen Brillen von verschiedener Schärfe so benutzt, dass sie alle dem Auge möglichst nahe stehen. — Nun wird ein kurzsichtiges Auge, bei welchem der Abstand seines Fernpunktes $= p$ ist, durch eine dicht vorgehaltene Linse von der Brennweite p einem normalsichtigen im Zustande der Ruhe gleich gemacht. Sei nun noch allgemein g der Abstand (des Nähe- oder Grenzpunktes), für welchen das normalsichtige Auge bei möglichster Anstrengung seines Accommodationsapparates eingestellt ist; dann ergibt sich aus einer einfachen Rechnung, die Fick angestellt, dass das mit der Zerstreuungslinse bewaffnete kurzsichtige Auge dem normalsichtigen durchweg optisch gleichwerthig sein würde, falls der Abstand des Grenzpunktes für das erstere $= \frac{p \cdot g}{p + g}$ wäre. Dasselbe würde sich also wie ein normalsichtiges (mit dem Grenzpunktsabstande g) verhalten, wenn sein Accommodationsvermögen von $\frac{pg}{p+g}$ bis p reichte. Für ein fernsichtiges Auge müsste, weil dann p negativ ist, der Abstand seines Grenzpunktes den Werth $\frac{pg}{p-g}$ haben.

Unter gewissen Umständen, nämlich bei sehr geringem Accommodationsvermögen, kann ein Auge in Bezug auf die gewöhnlichen Definitionen gewissermassen kurz- und fernsichtig zugleich sein. Dies wird der Fall sein, wenn ein Auge so beschaffen ist, dass es zum deutlichen Sehen naher Objecte einer Convexlinse, dagegen zum Sehen entfernter Objecte einer Concavlinse bedarf. Liegt z. B. für ein Auge der Fernpunkt verhältnissmässig sehr nahe, wie dies nach der obigen Definition bei einem kurzsichtigen Auge in der That der Fall ist, so erfordert das deutliche Sehen sehr entfernter Objecte den Gebrauch einer Zerstreuungslinse. Und wenn dasselbe Auge zugleich ein sehr geringes Accommodationsvermögen für die Nähe hätte, so würde zum bequemeren Lesen kleiner Schrift eine Convexlinse erforderlich sein.

190. Nach diesen Betrachtungen über Kurz- und Fernsichtigkeit wenden wir uns noch einmal zu der Loupe oder dem einfachen Mikroskope zurück. Im §. 32 (Abth. 1.) ist gezeigt, wie

man gewöhnlich die Vergrösserung einer solchen Linse zu bestimmen pflegt. Die nachstehende Figur (Nr. 1) zeigt nun nach be-

Fig. 130.



kannten dioptrischen Gesetzen den Gang, den die von einem Object *ab* kommenden Lichtstrahlen in der Linse *o* und den optischen Medien des Auges nehmen, um auf der Retina des letzteren das verkehrte Bildchen $a'b'$ zu erzeugen. Vermittelst der vorgeschobenen Linse werden hier die Lichtstrahlen so gebrochen, als ob sie von einem entfernteren Object $a''c''b''$ herkämen. So erscheint das Object *ab* mittelst der Linse in grösserer Entfernung als mit freiem Auge, und auch unter einem grösseren Gesichtswinkel, der durch die Richtungslinien $a'ka''$ und $b'kb''$ bestimmt ist, die sich im Kreuzungspunkte *k* schneiden. Ohne Linse wäre derselbe mittelst der durch den Kreuzungspunkt nach den Endpunkten des Objects gezogenen Richtungslinien gegeben. Die Linse gewährt also ein grösseres Netzhautbild, dessen Durchmesser sich nach van Rees*) aus folgender Rechnung ergibt, die wir hier vorführen, weil sie zugleich eine gewisse Einsicht in die Eigenthümlichkeit der Linse (Loupe) in Bezug auf Kurz- und Fernsichtigkeit gestattet. Die Linie Fig. 130. Nr. 2 bezeichnet, wie in Nr. 1, die verlängerte Axe der Linse und des Auges; c' sei die Netzhaut, *k* der Kreuzungspunkt der Richtungslinien, *o* der optische Mittelpunkt der Loupe, *c* der Ort des Objects und c'' der des scheinbaren Bildes, welches man mittelst der Loupe wahrnimmt. Es sei ferner *d* der Durchmesser des Objects, d'' der des scheinbaren Bildes, d' der des Netzhautbildes, $a = c''k$ die mittlere Sehweite vom Kreuzungspunkte an gerechnet, $b = ok$ die Entfernung der Loupe vom Kreuzungspunkte, $r = c'k$ die Entfernung der Netzhaut vom Kreuzungspunkte, und

*) Harting: Das Mikroskop, a. d. Holländ. von Theile, Brnschw. 1859. S. 98 f.

endlich f die Brennweite der Linse. Nun verhält sich $d'' : d = c''o : co$.

Es ist aber auch (vgl. §. 32. Abth. 1) $co = \frac{f \cdot c''o}{c''o + f}$, und daher statt der vorigen Proportion:

$$d'' : d = 1 : \frac{f}{c''o + f},$$

oder, da $c''o = a - b$ ist,

$$d'' : d = 1 : \frac{f}{a - b + f},$$

also
$$d'' = \frac{a - b + f}{f} \cdot d.$$

Aus den Dreiecken $a''kb''$ und $a'kb'$ (Fig. 130. Nr. 1), welche die Richtungslinien $a'ka''$ und $b'kb''$ bilden, folgt aber die Proportion: $a'b' : a''b'' = kc' : kc''$ oder, wenn man die oben eingeführten Buchstabenwerthe setzt, $d' : d'' = r : a$, also

$$\begin{aligned} d' &= \frac{d''r}{a} \\ &= \frac{a - b + f}{a} \cdot \frac{rd}{f} \\ &= \left(1 + \frac{f - b}{a}\right) \cdot \frac{rd}{f}. \end{aligned}$$

In diesem Ausdrucke für den Durchmesser des Netzhautbildes sind b, d, f, r gegebene Grössen, die nur von den Dimensionen des Auges, sowie von der Lage und der Brennweite der Loupe abhängen, während die mittlere Sehweite a durch die individuelle Beschaffenheit des Auges, die man Kurz- und Fernsichtigkeit nennt, beeinflusst wird. Um diesen Einfluss näher zu bestimmen, unterscheidet van Rees drei Fälle.

1) $f = b$, d. h. die Brennweite der Loupe ist gleich der Entfernung der letzteren vom Kreuzungspunkte. Man hat dann $d' = \frac{rd}{f}$. In diesem Falle verschwindet also, da a aus dem Ausdrucke für d' herausfällt, der Einfluss der Kurz- und Fernsichtigkeit ganz, so dass das Netzhautbild für Kurz- und Fernsichtige gleich gross ist.

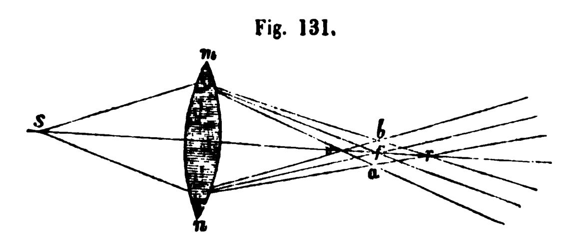
2) $f > a$. Da der Bruch $\frac{f - b}{a}$, also auch d', um so grösser, je kleiner a, so ist in diesem Falle das Netzhautbild für Kurzsichtige grösser als für Fernsichtige.

3) Für $f < b$ wird der Bruch $\frac{f-b}{a}$ negativ, daher d' um so kleiner, je geringer a ist, so dass nun das Netzhautbild für Kurzsichtige kleiner wird als für Fernsichtige (s. §. 32).

Dieser dritte Fall ist der gewöhnliche und sogar der einzig mögliche bei stark vergrössernden Loupen, deren Brennweite f weniger als 10mm beträgt, während $ok = b$ wohl stets grösser als der soeben angeführte Werth ist.

191. Wir haben (S. 110 f.) erkannt, dass die Brechung des weissen Lichtes in Linsen auf ganz ähnliche Weise wie in Prismen zu Farbenerscheinungen Anlass geben muss, indem in so gestalteten Medien die verschiedenartigen Bestandtheile dieses Lichtes, wegen ungleicher Brechung, voneinander geschieden werden; denn jeder besonderen Strahlengruppe, die als sog. homogene Farbe in die Zusammensetzung des weissen Lichtes eingeht, entspricht in einem und demselben brechenden Medium ein besonderer Brechungsindex. Auch in einem System sphärisch gestalteter Medien kann eine solche Zerlegung des weissen Lichtes nicht ausbleiben, wenn die Brechung beim Uebergange des Lichtes von einem Medium zum anderen stets in gleichem Sinne geschieht, d. h. so dass die Strahlen immer der Axe zu oder stets von ihr hinweg gebrochen werden. Beseitigung der Farbenzerstreuung erfordert Brechungen im entgegengesetzten Sinne (S. 112). Ist nun das Auge ein System optischer Medien, welche bezüglich der Axe die Strahlen stets in gleichem Sinne brechen, so kann es nicht frei von chromatischer Abweichung sein. Die rothen Strahlen werden am schwächsten, die violetten am stärksten gebrochen, und so entspricht auch im Auge einem leuchtenden Punkte, der ihm weisses Licht zusendet, eine Reihe farbiger Bilder.

Fig. 131.



Nun zeigt uns aber das Auge, unter gewöhnlichen Umständen, beim Betrachten weisser Objecte, keinen jener Farbensäume,

die aus der chromatischen Abweichung sphärisch gestalteter Medien resultiren. Und in der That werden dieselben auch, ungeachtet der wirklich vorhandenen chromatischen Abweichung, nicht merklich hervortreten können, wenn das Auge sich für den Vereinigungspunkt der Strahlen von mittlerer Brechbarkeit, also ungefähr der grünen, einstellt, wo dann der Abweichungskreis *ab* auf die Netzhaut fallen wird. In diesem Kreise findet eine derartige Vereinigung der Spectralfarben statt, dass dieselbe als weiss hervortreten muss, zumal in seinem mittleren Theile, wo die Mischung am vollkommensten und die Lichtstärke am grössten ist, während letztere nach dem Rande hin sehr rasch abnimmt. Und so kann die stärkere Erregung, welche von dem mittleren weissen Theile des Zerstreuungskreises *ab* herrührt, die am Rande vorhandene schwächere Färbung bis zum Unmerklichwerden der letzteren übertönen. Sodann kommt noch in Betracht, dass die Dispersion der Augenmedien überhaupt nicht beträchtlich ist, und endlich, dass beim Sehen heller Objecte die Pupille enger wird und dadurch auch die in chromatischer Hinsicht sehr störenden Randstrahlen ausgeschlossen werden.

Aus dem Vorstehenden folgt aber noch, dass das von einem Objectpunkte kommende Licht unter allen Umständen einen kleinen Zerstreuungskreis auf der Retina bilden muss; daher uns ein und dasselbe Object in weissem Lichte (überhaupt in gemischtem) grösser als in einfachem erscheinen wird, worauf wir später noch einmal zurückkommen werden.

192. Wenngleich nun die Objecte bei wohl accommodirtem Auge auf die bezeichnete Weise achromatisch d. h. ohne farbige Säume erscheinen, so lassen sich doch auf experimentellem Wege leicht Farbenerscheinungen hervorrufen, die nur in der chromatischen Abweichung des Auges begründet sein können. Man betrachte z. B. eine weisse Scheibe auf schwarzem Grunde mit einem Auge, welches auf das Sehen eines näheren oder entfernteren Objects eingerichtet ist, oder mit beiden Augen, deren Axen sich in einem näheren oder ferneren Punkte schneiden; dann erblickt man an jener Scheibe farbige Säume*). Noch leichter aber erhält man eine Farbenerscheinung, wenn man nach Tourtual die Pupille eines Auges, das nach dem Rande eines weissen Objects, etwa einer

*) [illegible] Handb. der Physiologie, Bd. II. Abthl II. S. 348.

weissen Papierfläche oder eines Fensterstabes, sieht, zur Hälfte oder besser noch etwas über die Hälfte mit einem dicht vor das Auge gehaltenen undurchsichtigen Schirme bedeckt. Die Nothwendigkeit dieser Farbenerscheinung ergiebt sich aus der obigen Betrachtung (Fig. 131). Indem nämlich durch die theilweise Bedeckung der Pupille ein Theil der Farbestrahlen, die sich mit den anderen in dem Zerstreuungskreise auf der Retina zu Weiss ergänzen, beseitigt wird, muss jedenfalls eine bestimmte Färbung hervortreten, und zwar bei einer grösseren Anzahl weisser Punkte, d. h. bei einer weissen Fläche, die man betrachtet, an deren Rande, während auf anderen Netzhautstellen sich Farbestrahlen aller Art, von verschiedenen Punkten der weissen Fläche herkommend, mischen und den Eindruck des Weiss geben. Mittelst der Figur 131 ergiebt sich auch leicht, welche Randfärbung bei theilweiser Bedeckung der Pupille erscheinen muss; denn diese Färbung wird verschieden ausfallen, je nachdem man die obere oder untere Hälfte der Pupille bedeckt. Als Schirm kann man zu diesem Versuche irgend einen handlichen Gegenstand: eine Messerklinge, ein Kartenblatt, ein Stäbchen oder allenfalls auch einen Finger verwenden. Bedeckt man nun die obere Hälfte der Pupille, während das Auge nach der Grenzlinie *ab* der nebenstehenden Figur sieht, so erscheint diese Linie blau, dagegen gelb, falls die untere Hälfte der Pupille bedeckt wird. Bei der unteren Linie *cd* muss aber die Färbung unter denselben Umständen in umgekehrter Folge hervortreten. Imgleichen sieht man diese Farben an den vertikalen Rändern der Figur erscheinen, wenn man nach einander den rechten und linken Theil der Pupille bedeckt. Und ebenso erblickt man sie an den freien Rändern eines Papierblattes oder überhaupt eines weissen Objects.

Fig. 132.



193. Auf demselben Princip beruhen die von A. Fick und Czermak angegebenen Methoden, um die chromatische Abweichung des Auges bemerklich zu machen. Nach dem ersteren*) sieht man durch ein feines Loch in einem nahe vor dem Auge be-

*) Med. Physik. S. 319.

findlichen undurchsichtigen Schirm nach einer feinen Lichtlinie, die man z. B. erhält, wenn man in ein Kartenblatt einen feinen Schlitz schneidet und dasselbe vor eine Lampenflamme bringt. Wenn nun das Loch vor dem Centrum der Pupille liegt, bemerkt man keine Farbenerscheinung; befindet es sich aber in der Nähe des oberen oder unteren Randes der Pupille, wenn z. B. die Lichtlinie horizontal ist, so erscheint die letztere, bis auf die Mitte, die annähernd weiss aussieht, in ein breites Spectrum aufgelöst. Sieht man mit einem Auge durch zwei feine Löcher, die auf entgegengesetzten Seiten gleich weit vom Mittelpunkte der Pupille entfernt liegen, nach der Lichtlinie; dann erscheint diese, falls das Auge nicht für ihre Entfernung, sondern für eine kleinere oder grössere eingestellt ist, in einem farbigen Doppelbilde. Sei das Auge z. B. für einen kürzeren Abstand eingestellt, und nähere sich dasselbe allmälig der Lichtlinie, so nähern sich auch einander die beiden Spectra derselben. Sobald nun das Auge die Entfernung erreicht, für welche es genau, — nämlich für die Strahlen mittlerer Brechbarkeit, — eingestellt ist, fallen die beiden Spectra auf einen und denselben Ort, und zwar derartig, dass auf jede Farbe des einen diejenige Farbe des anderen fällt, welche gerade soweit von der Mitte des Spectrums nach der entgegengesetzten Seite abliegt. Man sieht dann, wie es nach der obigen Betrachtung (Fig. 131) zu erwarten ist, ein etwas breiteres, aber ziemlich weisses Bild der Lichtlinie.

Czermak machte in ein Kartenblatt 10 bis 20 feine Löcher, die auf einem Kreise von etwa 2—5^{mm} Durchmesser lagen, und hielt dasselbe gegen einen hellen Hintergrund. Die von den Löchern gebildete Scheibe erschien dann diesseits des Nähepunktes gelblichroth, jenseits des Fernpunktes violett.

194. Der unvollkommene Achromatismus des Auges ergibt sich auch aus folgender Erscheinung, die von Dove, Stokes, Haidinger und Plateau hervorgehoben wurde*). Sieht man nämlich nach einem hellen, wohlbegrenzten Gegenstand (Lichtflamme, Sonnenscheibe) durch ein gewisses tiefblaues Glas oder durch eine Combination mehrerer solcher Gläser, welche nur die äussersten rothen und violetten Strahlen durchlassen, so erscheinen die sich

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXV. u. XCVI. S. 331; Dove: Darstellung der Farbenlehre und optische Studien. S. 174.

zugleich darbietenden rothen und violetten Bilder des Gegenstandes nicht gleich deutlich beisammen. Beim Anblick der Sonne sieht man z. B. auf diese Weise eine wohlbegrenzte rothe Scheibe und eine undeutliche violette Scheibe von etwa dem doppelten Durchmesser der ersteren. Nun kann man diese violette Scheibe zwar mit Hilfe einer Linse deutlich machen, allein dann wird die andere, vorher scharf gesehene, undeutlich. So ist also das Auge beim Betrachten der Sonne (durch das betreffende Glas) dergestalt accommodirt, dass auf seiner Netzhaut wohl die rothen, nicht aber die violetten Strahlen vereinigt werden. Und demgemäss bemerkt Stokes, dass er in der That entfernte Gegenstände deutlich vermittelst der äussersten rothen Strahlen sehen könne, aber entschieden kurzsichtig in Bezug auf die violetten sei, dagegen etwas weniger für Strahlen mittlerer Brechbarkeit und gewöhnliches Licht. — Die ersten hierauf bezüglichen und mit dem Vorigen übereinstimmenden Wahrnehmungen machte Frauenhofer bei Gelegenheit seiner Beobachtungen des Sonnenspectrums *). Und spätere Beobachtungen von Matthiesen **) und neuerdings von Helmholtz führten zu demselben Resultate. Letzterer liess nacheinander die verschiedenen mittelst eines Prisma gesonderten Farbestrahlen durch eine runde Oeffnung in einem undurchsichtigen Schirme gehen, und bestimmte dann die grösste Entfernung, aus welcher die Oeffnung noch deutlich für ihn sichtbar war. Es fand sich, dass der Fernpunkt seines Auges für die rothen Strahlen 2,3 Meter, für die violetten 0,485 M. und für die übervioletten Strahlen nur 0,050 — 0,100 M. vom Auge abstand. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass der Fernpunkt für rothes Licht weiter vom Auge absteht als für die übrigen Farbestrahlen, während der Nähepunkt für das am stärksten brechbare violette Licht dem Auge näher liegt als für die sonstigen minder brechbaren Lichtarten.

195. Betrachten wir das Auge in der uns bekannten Weise als ein centrirtes System sphärisch gestalteter Medien, so kann dasselbe nur dann von der sphärischen Abweichung (S. 74, Abth. 1) frei sein, wenn die Strahlen nahe der Axe und unter einem sehr kleinen Einfallswinkel eindringen. Falls diese Bedingung nicht erfüllt ist, können die Randstrahlen, weil sie stärker als die mittle-

*) s. Gilbert's Annalen. Bd. LVI. S. 304.

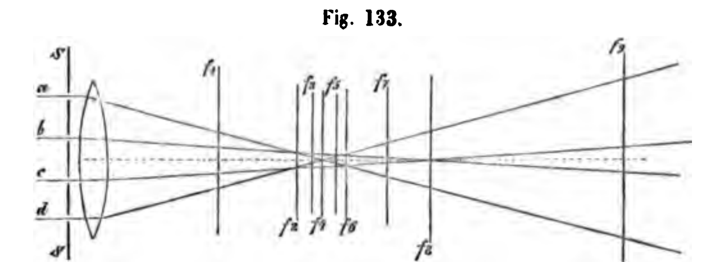
**) Poggend. Ann. Bd. LXXI. S. 578.

ren gebrochen werden, mit den letzteren nicht in einem Punkte vereinigt werden, was auch von homogenen Strahlen (derselben Farbe) gilt, die von einem Objectpunkte ins Auge dringen; sie können nicht in einem Punkte auf der Netzhaut zur Vereinigung kommen, selbst wenn dasselbe für die Entfernung des leuchtenden Punktes möglichst vollständig adaptirt ist. Indessen gibt sich diese sphärische Abweichung beim gewöhnlichen Sehen auf keine irgendwie auffallende Weise kund, wovon man den Grund zunächst darin suchen kann, dass die vorzugsweise störenden Randstrahlen, namentlich beim Betrachten sehr heller Objecte, zum Theil durch die Iris abgehalten werden, und dann auch in dem schichtenförmigen Bau der Linse, der von der Art ist, dass die Schichten nach der Mitte hin nicht allein an Dichte, sondern auch an Convexität zunehmen. Dieser Umstand bringt es mit sich, dass selbst bei weit geöffneter Pupille die Randstrahlen, die überdies eine geringere Anzahl von Schichten zu durchdringen haben, nicht beträchtlich stärker als die mittleren Strahlen gebrochen werden. Jedenfalls müssen die Randstrahlen hier eine geringere Brechung erfahren, als in einer gewöhnlichen sphärischen Linse, die bei gleichem Krümmungshalbmesser mit der Krystalllinse des Auges nicht wie diese schichtenförmig zusammengefügt ist, sondern eine innerlich durchweg optisch homogene Masse darbietet. Endlich kommt noch hinzu, dass die Trennungsflächen der optischen Augenmedien (Hornhaut und Linse) nicht einmal streng sphärisch, sondern vielmehr ellipsoidisch gekrümmt sind (§. 143 f.), wodurch gleichfalls die Brechung der Randstrahlen, insofern die Krümmung der Fläche nach dem Rande hin schwächer wird, eine Verminderung erfährt (S. 74 f.). Und in der That folgt aus einigen von Volkmann*) mitgetheilten Versuchen, dass es Augen gibt, bei welchen die Randstrahlen schwächer als die mittleren gebrochen werden, während allerdings in andern wieder, wie es die sphärische Abweichung erfordert, die Brechung der Randstrahlen stärker als die der mittleren ist.

196. In nachstehender Figur ist der Gang der Lichtstrahlen nach ihrer Brechung durch eine Linse verzeichnet, welche, der sphärischen Abweichung gemäss, die Randstrahlen stärker als die mittleren Strahlen bricht. *SS* ist ein Schirm mit vier Löchern, durch welche vier Lichtstrahlen einfallen: zwei Randstrahlen *a*, *d*

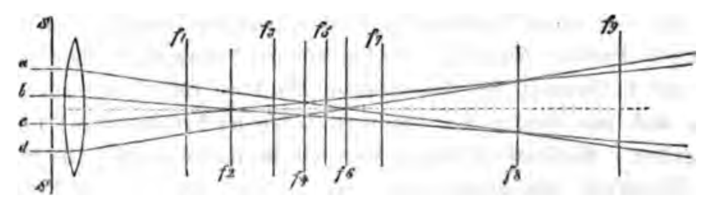
*) R. Wagner's Handw. d. Physiol. Bd. III. Abthl. 1. S. 291.

Fig. 133.



und zwei mittlere *b, c*. Ein bildauffangender Schirm $f_1, f_2, \ldots$ in verschiedenen Abständen von der Linse aufgestellt, wird eine verschiedene Zahl und Anordnung der Bilder zeigen, je nach der Art und Weise, wie er von den durch die vier Löcher gehenden Lichtstrahlen getroffen wird. So findet sich, dass in der Stellung f_9 die Reihefolge der vier Bilder gerade die umgekehrte von der in f_1 ist. Dagegen ergiebt sich eine ganz andere Stellung der Bilder, wenn, wie Fig. 134 zeigt, die mittleren Strahlen eine stärkere Brechung als die Randstrahlen erfahren.

Fig. 134.



In den Volkmann'schen Versuchen wurde nun durch vier nahe befindliche feine Oeffnungen in einem Kartenblatte nach einem Objecte gesehen, das anfänglich dem Auge ganz nahe allmälig weiter und weiter bis zum Undeutlichwerden entfernt wurde, um die successive Stellung und Anzahl der erscheinenden Bilder zu ermitteln. Es mussten sich dann, je nach der optischen Beschaffenheit des betreffenden Auges, ähnliche Verhältnisse in Hinsicht auf die Anordnung der Bilder wie die zuvor angedeuteten geltend machen, da es für die Vereinigung der Lichtstrahlen zu demselben Resultat führen wird, ob man bei feststehendem Object die Distanz des bildauffangenden Schirmes, oder bei feststehendem Schirm (Netzhaut) die Distanz des Objects von der Linse ändert. So konnte denn auch aus der Anordnung, welche die Bilder successiv während der Entfernung des Objects vom Auge zeigten, auf die Bre-



chungsverhältnisse des letzteren geschlossen werden*), und es fand sich, dass manche Augen, wie in Fig. 133, die Randstrahlen stärker als die mittleren Strahlen brechen, während es sich bei anderen umgekehrt verhält (Fig. 134). — Um bei diesen Versuchen die Anordnung der Bilder bequem auffassen zu können, erhielten die vier Oeffnungen im Kartenblatte eine Stellung, wie sie hier die Punkte .˙˙. angeben. Als Object diente aber eine sehr feine wohlpolirte Nähnadel, die entweder im reflectirten Sonnenlichte vor einem schwarzen Hintergrunde oder bei Lampenlicht beobachtet wurde, so dass im zweiten Falle sich die Bilder gegen ein erleuchtetes Milchglas als Schatten absetzten.

197. Wie wir bereits bemerkten, kann die sphärische Abweichung des Auges durch eine ellipsoidische Krümmung der brechenden Flächen, nämlich der Hornhaut und Linse, vermindert werden. Allein, da diese Flächen nach ausgeführten Messungen wahrscheinlich nicht einmal Rotationskörpern im strengen Sinne angehören, also nicht durch Umdrehung einer Ellipse um eine ihrer Axen regelmässig gebildet sind, so bedingt dies eine derartige Beschaffenheit des wirklichen Auges, dass in denselben niemals Strahlen, die von einem leuchtenden Punkte kommen, wieder zu einem einzigen Punkte vereinigt werden können, mag auch das Auge für die Entfernung des leuchtenden Punktes vollständig adaptirt sein und von diesem nur homogenes (monochromatisches) Licht ausgehen. Als Senff an einem Auge den horinzontalen Durchschnitt der Hornhaut mit ihrem vertikalen verglich, fand er die Krümmungshalbmesser dieser beiden Schnitte ein wenig verschieden, und zwar den Halbmesser des horizontalen Schnittes etwas grösser als den des vertikalen, so dass also der letztere etwas stärker als jener gekrümmt ist. Unter Annahme einer solchen Abweichung der brechenden Flächen von der Symmetrie um eine gemeinsame Axe hat aber Sturm**) dargethan, welche Form ein dünnes Bündel homogener von einem Punkte ausgehender Strahlen nach der Brechung annehmen muss.

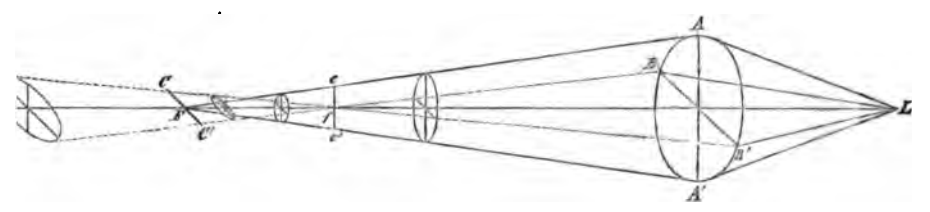
198. Gesetzt, es sei, wie Senff fand, der Halbmesser des horizontalen Hornhautschnittes grösser als der des vertikalen, und

*) s. am citirt. O.

**) Compt. rend. T. XX. p. 554, 761. 1238; in Poggend. Ann. Bd. LXV. S. 116.

es falle von einem Lichtpunkte L ein Strahlenbündel auf die convexe Hornhautoberfläche. Dann werden sich die horizontalen Strahlen LA, LA' nach ihrer Brechung in grösserer Entfernung vereinigen als die vertikalen LB und LB', da diese wegen der stärkeren

Fig. 135.



Krümmung der Hornhaut im vertikalen Sinne stärker als jene gebrochen werden. Die Strahlen LB, LB' vereinigen sich also, nachdem sie gebrochen, früher (im Punkte f) als die horizontalen LA, LA', deren Vereinigungspunkt im Punkt F liegen mag. Während aber die vertikalen Strahlen sich im Punkte f schneiden und von hieraus divergirend weiter gehen, bilden daselbst die gesammten horizontalen Strahlen eine zu AA' parallele Linie cc'; dagegen gestalten sich in dem Moment, wo die horizontalen Strahlen sich im Punkte F vereinigen, die vertikalen zu einer durch diesen Punkt gehenden vertikalen Linie CC', die zu BB' parallel ist. Nun sind also die vom Lichtpunkte L ausgehenden und durch die Hornhaut gebrochenen Strahlen innerhalb der Strecke zwischen den Linien cc' und CC' zu einem sehr schmalen Bündel vereinigt, in Bezug auf welches Sturm die Punkte F,f die Brennpunkte und die Gerade Ff die Brennstrecke nennt. Sonach existirt für die von einem einzigen Lichtpunkte ins Auge dringenden Strahlen nicht ein einziger Brenn- oder Convergenzpunkt, sondern vielmehr eine Brennstrecke, die mehr oder weniger lang sein kann. Dieselbe kann sehr klein, aber doch nicht absolut null sein, eben weil das Auge eine Combination mehrerer brechender Mittel ist, deren Trennungsflächen, streng genommen, weder sphärisch, noch symmetrisch gegen eine gemeinsame Axe sind. Schneidet nun die Brennstrecke die Netzhaut in irgend einem zwischen F und f gelegenen Punkte, so nimmt das gebrochene Lichtbündel auf der Fläche der Netzhaut nur einen sehr kleinen Raum ein, der nahe von gleicher Grösse sein wird, wo sich auch die Netzhaut innerhalb dieser Strecke befinden mag. Hingegen wird das Lichtbün-

del ein viel grösseres Flächenstück der Netzhaut beleuchten, wenn die letztere ausserhalb der bezeichneten Strecke zu liegen kommt. Man erkennt aber auch, dass das einem Lichtpunkte entsprechende Bild auf der Netzhaut, je nach der Stellung derselben in der Brennstrecke, von verschiedener Gestalt sein muss. Geht die Netzhaut durch den Punkt *f* oder *F*, so stellt das Bild des Lichtpunktes eine gerade Linie dar, und zwar dort eine horizontale *cc'*, hier eine vertikale *CC'*. Nahe in der Mitte der Brennstrecke wird das Bild kreisförmig erscheinen, während diesseits und jenseits dieser Strecke die Schnitte des gebrochenen Lichtbündels mit der Netzhaut, also auch die dem Lichtpunkte entsprechenden Zerstreuungsbilder Ellipsen sein werden. Es folgt nun von selbst, dass, wenn das hintere Ende *CC'* der Brennstrecke *Ff* auf die Netzhaut fällt, eine leuchtende vertikale Linie, die vor dem Auge steht, in vollkommener Schärfe erscheinen wird, jedoch etwas verlängert, da den Objectpunkten kleine vertikale Linien als Zerstreuungsbilder entsprechen. Und nicht minder wird in diesem Falle eine vertikale schwarze Linie auf hellem Grunde deutlich wahrzunehmen sein, während dagegen eine horizontale helle Linie breiter und eine horizontale schwarze verwaschen erscheinen wird.

Ganz ähnliche Verhältnisse werden sich geltend machen, wenn, was gleichfalls vorkommen kann, der vertikale Hornhautdurchschnitt, im Gegensatz zu der bisherigen Annahme, weniger gekrümmt ist als der horizontale. Weil aber dann die in jenem Schnitte liegenden Strahlen später vereinigt werden als die im horizontalen Schnitte befindlichen, so müsste jetzt das vordere, im vertikalen Sinne verlängerte Ende der Brennstrecke *Ff* mit der Netzhaut zusammenfallen, um vertikale Linien vollkommen scharf wahrzunehmen.

Fig. 136.



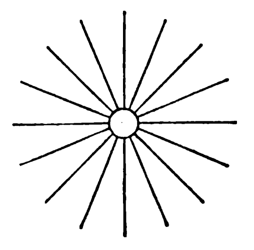
Beiläufig sei noch bemerkt, dass die in Rede stehende Abweichung keineswegs auf die Hornhaut beschränkt zu sein braucht, sondern auch ebenso an der vorderen Linsenfläche vorkommen kann.

199. Zur Bestätigung der zuvor erörterten Brechungsverhältnisse kann unter anderen eine Beobachtung dienen, die Airy, nach Sturm's Berichte, an seinem eigenen Auge machte. Derselbe fand, dass, wenn er zwei schwarze sich rechtwinklig schneidende Linien

in eine gewisse Entfernung vom Auge brachte, die eine dieser Linien sehr deutlich, die andere dagegen kaum sichtbar war. Als er das Papier dem Auge näherte, verschwand die Linie, die deutlich gewesen, während die andere mit Schärfe sichtbar wurde.

Dergleichen Erscheinungen kommen nun bei den meisten, wenn nicht bei allen, Augen vor, wie bereits Plateau*) wahrgenommen hat. Man zeichnet nach demselben auf weisse Pappe zwei schwarze Streifen unter rechtem Winkel, beide 8 — 9 Millimeter breit, legt die Pappe an einem recht hellen Ort so, dass der eine Streifen horizontal und der andere vertikal liegt, und entfernt sich dann etwa zwanzig Schritte. Bei dieser Entfernung erscheint der horizontale Streifen für gewisse Augen breiter und schwärzer als der vertikale, während es für andere Augen umgekehrt ist. Auch kehrt sich die Erscheinung um, wenn man den Kopf so neigt, dass die Verbindungslinie beider Augen vertikal wird. Neigt man den Kopf etwa 45°, oder lässt man den Kopf gerade und dreht die Karte so, dass beide Linien gleiche Neigung gegen den Horizont erhalten, so erscheinen sie von einerlei Breite und Färbung. Analoge Verhältnisse gewährt ein weisses Kreuz auf schwarzem Grunde. Betrachtet man ferner einen Kupferstich, worin sich zwei Systeme von Strichen rechtwinklig kreuzen, und entfernt sich langsam, indem man die Augen so stellt, dass die einen Striche horizontal und die anderen vertikal werden, so verliert das eine der beiden Systeme vor dem anderen an Deutlichkeit, woraus denn gleichfalls hervorgeht, dass die Strahlen der beiden sich rechtwinklig kreuzenden Systeme eine verschiedene Brechung und Ablenkung erfahren. Eben hierher gehören auch einige von Fliedner**) in Bezug auf Irradiation angestellte Versuche. Auf einer kreisförmigen Scheibe von sehr weissem Kartenpapier zieht man mit schwarzer Tusche acht oder sechzehn gleiche Winkel einschliessende Durchmesser von höchstens 0,1 Linie Breite. Bringt man nun diese Scheibe in vertikaler Stellung zuerst so dicht vor ein Auge (während das andere


Fig. 137.



*) Bullet. de l'acad. de Bruxelles, 1834, No. 27.

**) vgl. Poggend. Ann. Bd. LXXXV. S. 321, 460 u. Bd. LXXXVIII. S. 29.



geschlossen ist), dass alle Durchmesser undeutlich oder doppelt erscheinen, und entfernt sie dann allmälig weiter und weiter; so sieht man in bestimmten Entfernungen bestimmte Durchmesser schwärzer und mit schärferer Begrenzung, bestimmte andere dagegen heller und breiter als vor- und nachher auftreten. Aus den gesammten hierbei auftretenden Erscheinungen lässt sich, wie es auch von Fliedner geschehen ist, in Uebereinstimmung mit der obigen theoretischen Erörterung, folgern, dass jedes Auge in einem bestimmten Querschnitte eine kürzere, in dem darauf senkrechten eine grössere Brennweite hat als in den übrigen Querschnitten, und dass somit die von einem leuchtenden Punkte ins Auge fallenden Lichtstrahlen niemals in einem einzigen Punkte zusammentreffen, sondern nur innerhalb einer Brennstrecke, welche, je nach der Entfernung des Lichtpunktes, die Netzhaut mit ihren Endpunkten trifft, oder sie durchschneidet, oder ganz vor oder hinter sie fällt.

Um auf eine bequeme Weise zu erfahren, ob der wagrechte oder lothrechte Schnitt des Auges die stärkste Krümmung (bez. Brechung) besitzt, hat A. Fick*) zwei sehr feine schwarze Linien, die sich rechtwinklig kreuzen, in Vorschlag gebracht. Man bringt nämlich diese Linien, die eine wagrecht und die andere vertikal gehalten, allmälig dem Auge möglichst nahe, wo dann die meisten Personen nur eine Linie vollkommen scharf sehen werden, und zwar wird bei fortgesetzter Annäherung des Objects an das Auge entweder die wagrechte oder vertikale Linie zuerst undeutlich erscheinen. Gesetzt, es sei die wagrechte, so ist dies ein Anzeichen, dass die Krümmung im wagrechten Schnitte des betreffenden Auges grösser als im vertikalen ist. Indem nämlich das Object sich dem Auge bei möglichster Accommodationsanstrengung des letzteren mehr und mehr nähert, rückt die Brennstrecke immer weiter nach hinten, so dass sie zuerst mit ihrem hinteren, dann mit ihrem vorderen Ende die Netzhaut durchsetzt. Wenn nun zuerst die wagrechte und hierauf die vertikale Linie undeutlich wird, so muss, wie es scheint, das Zusammenfallen des vorderen Endes der Brennstrecke mit der Netzhaut einer Einstellung des Auges auf vertikale Linien entsprechen, was bedeutet, dass die im wagrechten Schnitte einfallenden Strahlen sich im vorderen Ende der Brennstrecke schneiden, oder dass sämmtliche von einem

*) Medicinische Physik, S. 328 f.

Punkte kommenden Strahlen sich daselbst zu einem kleinen vertikal stehenden linearen Bilde vereinigen. Diesem Falle entspricht demnach die Fig. 136. Fick bemerkt noch, und zwar, wie es mir nach meinen eigenen Erfahrungen scheint, mit vollem Rechte, dass dasselbe Auge zum Behufe deutlicher Wahrnehmung eines Objects sich bald auf vertikale, bald auf lothrechte Linien, und bald auch so einstellt, dass weder die einen noch die andern mit möglichster Schärfe, aber beide gleich scharf gesehen werden, wobei denn nacheinander bald das eine, bald das andere Ende, bald die Mitte der Brennstrecke auf die Netzhaut kommt. Auch ist es kaum zu bezweifeln, dass die Form und Färbung des zu sehenden Objects auf die Accommodationsbestrebungen des Auges einen bestimmten Einfluss üben müssen.

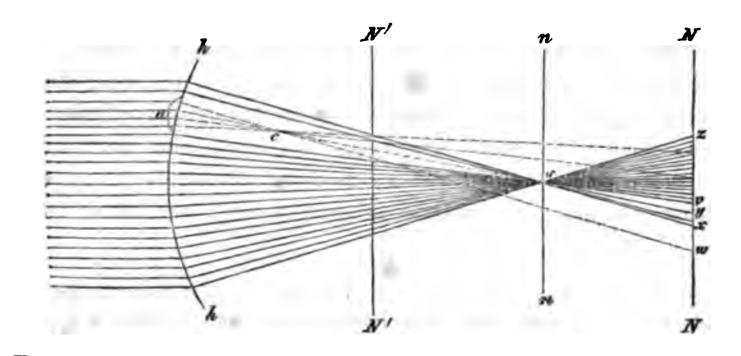
200. Anderweitige Abweichungen des wirklichen Auges vom schematischen Auge werden durch verschiedene mehr oder minder durchsichtige Unregelmässigkeiten bewirkt, die theils auf der Oberfläche der brechenden Medien, theils auch in deren Innerm vorkommen. Hierher gehören kleine Höckerchen und Vertiefungen auf den Trennungsflächen, so unter änderen Thränentröpfchen und Schleimstreifen auf der Hornhaut, und auch in den Medien Stellen, deren Brechungsvermögen grösser oder kleiner als das ihrer Umgebung ist. Diese Umstände haben einen bestimmten Einfluss auf die Gestaltung der Zerstreuungskreise auf der Netzhaut, mag übrigens das von einem Objectpunkte einfallende Licht einfaches oder zusammengesetztes sein. Als einen Fall von besonderem Interesse haben wir hier das Doppelt- oder allgemeiner das Mehrfachsehen mit einem Auge*) hervorzuheben, eine Erscheinung, die wohl kaum eine Person bei genauerer Beachtung ganz vermissen wird. Die Erscheinung ist nämlich die, dass ein Object, welches diesseits oder jenseits der deutlichen Sehweite liegt, doppelt oder mehrfach erscheint. Mitunter ist die Anzahl dieser Bilder sehr gross, doch haben meist nur wenige derselben eine beträchtliche Intensität, so dass nicht selten, während der Beobachtung, ihre mehrere zusammenfliessen und schliesslich nur zwei Bilder beson-

*) s. Stellwag v. Carion in Denkschriften der k. k. Akademie der Wissensch. Bd. V. 2. S. 172; Gut, Inauguraldissertation, Zürich 1854; A. Fick in Zeitschrift für rat. Medicin von Henle u. Pfeuffer, 1854, sowie desselben medic. Physik, S. 331; H. Meyer in Zeitschrift für rat. Med. Bd. V. S. 368.

ders auffallend hervortreten. Um die Erscheinung wahrzunehmen, schliesse man ein Auge und bringe dem anderen etwa die Spitze eines Zirkels oder einer Nadel aus der deutlichen Sehweite allmälig immer näher. Man wird dann bei einer gewissen Entfernung des Objects bemerken, dass die Spitze mehrfach auseinander tritt, und zwar nimmt die Anzahl der Bilder meist mit der Annäherung des Objects an das Auge zu. Anstatt der bezeichneten Spitze kann man auch, und zwar noch besser, eine feine Linie benutzen, die man in der eben angegebenen Weise dem Auge nähert, wo man dann mehrere parallele Linien nebeneinander sehen wird. Ebenso erscheinen auch manche entfernte schmale Objecte, wie z. B. die Spitze eines Kirchthurmes, falls sie jenseits der deutlichen Sehweite liegen, doppelt oder mehrfach. Kurzsichtigen wird sich in diesem Falle die Erscheinung viel leichter darbieten als Fernsichtigen; auch ist meist bei einem und demselben Individuum das eine Auge vorzugsweise oder auch nur allein mit dieser Abweichung behaftet, was zum Theil mit dem Umstande zusammenhängt, dass die deutliche Sehweite für beide Augen verschieden ist.

201. Als eine Bedingung für den Eintritt dieser Erscheinung ist im Bisherigen schon die unvollständige Accommodation des Auges für die Entfernung des Objects ausgesprochen. Dass dieselbe nur bei unvollständiger Accommodation stattfindet, hat namentlich H. Meyer zuerst dargethan, obwohl man schon früher darauf hingewiesen hatte. Eine theoretische Ableitung derselben auf Grund der oben angeführten Unregelmässigkeiten gab A. Fick *).

Fig. 138.



*) Medic. Physik. S. 331 ff.

Es bezeichne in nebenstehender Figur *hh* einen Meridianschnitt der Hornhaut, auf deren vorderer Fläche beispielsweise ein kleines durchsichtiges Höckerchen *a* in Form eines Kugelsegments, also etwa ein kleines Thränentröpfchen sitze. Fallen nun z. B. parallele Strahlen, die von einem entfernten leuchtenden Punkte kommen, auf die als kugelförmig gedachte Hornhaut, so werden sie dergestalt gebrochen, dass ihr Vereinigungspunkt etwa nach *s* fällt, während die Strahlen, die das stärker als die Hornhaut gekrümmte Höckerchen durchsetzen, in einem derselben näher gelegenen Punkte *c* zur Vereinigung gelangen, von wo aus sie dann nach der Netzhaut hin divergiren. Gesetzt nun, die Netzhaut gehe durch *s*, den Vereinigungspunkt der regelmässig gebrochenen Strahlen; dann wird die Anwesenheit des durchsichtigen Höckerchens nur die Folge haben, dass um den Punkt *s* ein schwacher Lichtschimmer entsteht, der ohne Unterbrechung von *s* aus ringsum an Stärke abnimmt. Denn während vom Höckerchen her ein mittlerer Strahl zum Vereinigungspunkte *s* gelangt, werden die demselben angehörigen Randstrahlen rings um den Punkt *s* die Netzhaut treffen und hier zu jenem Lichtschimmer Anlass geben. Und hierin werden mehrere auf der Hornhaut sitzende Höckerchen nichts ändern, denn das eine wie das andere wird nur einen stetigen und nach aussen abnehmenden Lichtschimmer bewirken. Befindet sich dagegen die Netzhaut nicht in *nn*, sondern der Hornhaut näher oder ferner, d. h. mit anderen Worten: ist das Auge nicht gerade für die Entfernung des leuchtenden Punktes, sondern für einen näheren oder entfernteren adaptirt, so gestaltet sich die Erscheinung anders. Angenommen, das Auge sei für einen näheren Punkt adaptirt, dann liegt der Vereinigungspunkt der von der Hornhaut regelmässig gebrochenen Strahlen vor der Netzhaut, die jetzt in *NN* stehen mag, während auf dieser selbst ein Zerstreuungsbild *xz* entsteht, das, wegen Anwesenheit des Höckerchens, bei *y* durch eine dunkle oder minder erleuchtete Lücke unterbrochen ist, insofern nämlich als die durch das Höckerchen gegangenen Strahlen auf eine grössere Fläche zerstreut werden. Einige dieser Strahlen, die ohne die Unregelmässigkeit bei *a* auf *y* gefallen wären, treffen mit regelmässig gebrochenen zusammen, und erhöhen da, wo dies geschieht, die Helligkeit des Zerstreuungsbildes, andere aber, die ganz ausserhalb des letzteren fallen, vergrössern seine Ausdehnung. Das Resultat ist, dass das Zerstreuungsbild

eines leuchtenden Punktes, obschon im Ganzen kreisförmig begrenzt, aus abwechselnd hellen und dunklen Stellen besteht; und daher wird denn auch das Zerstreuungsbild einer leuchtenden Linie in mehrere durch dunkle Zwischenräume geschiedene Linien zerfallen. — Ungeachtet nun bei verschiedener Anordnung der Thränentröpfchen die mannichfachste Lichtvertheilung im Zerstreuungsbilde des Objects herbeigeführt werden kann, bleibt doch der Charakter der Erscheinung im Ganzen unverändert; die aus hellen und dunklen Stellen bestehenden Punktbilder werden sich immer zu ähnlichen Linienbildern zusammensetzen, und eine leuchtende Linie immer mehrfach mit sich selbst parallel wiederholt erscheinen.

Ganz ähnliche Verhältnisse stellen sich heraus, wenn das Auge für eine grössere Entfernung als für die des gegebenen leuchtenden Objects eingestellt ist, und daher der Vereinigungspunkt der von der Hornhaut regelmässig gebrochenen Strahlen hinter die Netzhaut $N'N'$ fällt.

202. Vergleicht man nun, wie es von Fick geschah, die Zerstreuungsbilder einer Camera obscura, deren Brennweite etwa 50^{mm} beträgt, mit denen des Auges, so kann man sich leicht sowohl von der überraschenden Aehnlichkeit beider, als auch von der Richtigkeit der gegebenen theoretischen Ableitung überzeugen. Man bringt auf die Vorderfläche der Linse in willkürlicher Anordnung kleine Oeltröpfchen und stellt dann die Camera obscura auf ein Object genau ein. Ist letzteres ein sehr intensiv leuchtendes, so bemerkt man an dem Bilde, das sich auf einer mattgeschliffenen Glastafel darstellt, den oben erwähnten Schimmer, der auch an einem sehr hellen, glänzenden Objecte, z. B. an dem von einer Thermometerkugel reflectirten Sonnenbildchen, mit blossem Auge wahrgenommen wird. Freilich kann derselbe, weil er von Strahlen herrührt, die über einen grossen Raum zerstreut werden, bei mässig leuchtenden Objecten nicht merklich hervortreten, die eben bei vollständiger Adaption des Auges ganz genau erscheinen.

Ein weisser Punkt auf schwarzem Grunde zeigt nun, als Object vor die Camera obscura gebracht, auf der matten Glastafel ein Zerstreuungsbild in der Art und Weise, wie es die obige theoretische Ableitung verlangt, wenn die Camera nicht genau für die Entfernung des Punktes, sondern etwa für eine kleinere eingerichtet ist. Unter denselben Umständen erscheint eine weisse Linie

auf schwarzem Grunde mehrfach wiederholt, parallel mit sich selbst, nebeneinander; man sieht sie als Zerstreuungsbild der Camera obscura so, wie mit einem Auge bei unvollständiger Adaption desselben, nämlich als eine Reihe paralleler Linien, die durch mehr oder minder dunkle Zwischenräume voneinander geschieden sind.

Es ist begreiflich, dass ein dunkles Object auf weissem Grunde im Wesentlichen dieselbe Erscheinung wie ein helles auf dunklem Grunde gewähren muss. Und in der That zeigt eine feine schwarze Linie auf weissem Grunde sich diesseits der deutlichen Sehweite mehrfach: als eine Reihe paralleler schwarzer Linien, die durch helle Zwischenräume voneinander getrennt sind. Natürlich kann die Erscheinung in diesem Falle nur durch die Combination der Zerstreuungsbilder bedingt sein, die von den die gegebene schwarze Linie begrenzenden Punkten des hellen Grundes herrühren.

203. Wenn sich die besprochene Erscheinung in einer gewissen Entfernung des Objects darstellt, lässt sich eine Veränderung derselben durch den Lidschlag bewirken, indem hierdurch die Thränenfeuchtigkeit auf der Hornhaut eine andere Anordnung erfährt. Die Veränderung besteht aber meist darin, dass neue Linien, mitunter in beträchtlicher Anzahl erscheinen, oder hie und da ein Zwischenraum schmäler oder auch breiter wird. — Da nun bei der erörterten Erscheinung ein constantes Auftreten von nur zwei Bildern nicht stattfindet, so kann dieselbe auch nicht, wie es früher vor der genaueren Untersuchung gebräuchlich war, durch den Ausdruck: Doppelsehen mit einem Auge (diplopia monophthalmica) bezeichnet werden, sondern eher noch als „Mehrfachsehen mit einem Auge", falls man sie nicht nach Fick's Vorschlage einfach „Discontinuität der Zerstreuungsbilder" nennen will. Denn nach dem Vorstehenden besteht sie wesentlich in einer solchen Discontinuität, mag diese letztere nun von durchsichtigen Höckerchen und Vertiefungen auf den brechenden Flächen oder von sonstigen durchsichtigen Unregelmässigkeiten in den brechenden Medien selbst herrühren.

Erinnern wir uns noch, dass das Zerstreuungsbild eines leuchtenden Punktes in Folge der Abweichung der Augenmedien von der Kugelgestalt, je nach der Stellung der Netzhaut zur Brennstrecke (§. 197 f.), kreisförmig oder oval sein kann, so begreift man leicht eine Erscheinung, die aus der vereinigten Wirkung

dieser und der kurz zuvor erörterten Abweichung des Auges resultirt *). Die Erscheinung besteht darin, dass sich das Bild eines kleinen Kreises, den man über die Accommodationsgrenze hinaus dem Auge nähert oder von ihm entfernt, als eine Menge in einandergreifender Kreise darstellt, die von einer Ellipse eingehüllt werden, deren grosse Axe in jenem Falle lothrecht, im zweiten dagegen wagrecht liegt.

Verschiedene andere Umstände, die auf die Gestaltung der Retinabilder Einfluss gewinnen können, werden wir in einem anderen Kapitel, worin von den Lichtempfindungen insbesondere die Rede ist, vorführen.

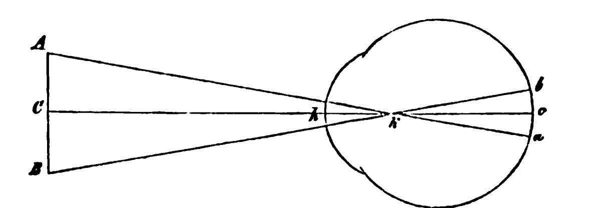
Drittes Kapitel.

Räumliche Beziehungen zwischen den Retinabildern und Gesichtsobjecten.

A. Scheinbare Grösse eines Objects und Irradiation.

204. Die scheinbare Grösse eines Objects, das wir mit dem Auge wahrnehmen, ist bedingt durch die Grösse des entsprechenden Retinabildes. Denkt man sich, wenn das Auge für die Entfernung eines Objects eingestellt ist, von den Endpunkten des letzteren

Fig. 139.



durch den Kreuzungspunkt *k* die Richtungslinie *Aa* und *Bb* gezogen, so schliessen dieselben den sog. Seh- oder Gesichtswinkel ein, unter welchem, wie man sagt, das Object erscheint. Dieser Winkel steht mit der absoluten Grösse des Objects in directem Verhältniss, ist also um so grösser, je grösser das Object ist,

*) s. Fick a. a. O. S. 339, und H. Meyer in Zeitschr. für rat. Med. Bd. V. S. 368.

während er mit der Entfernung des letzteren vom Auge abnimmt. Eben so verhält es sich mit der Grösse des Retinabildes, die, wenn sie gegeben ist, auch den Gesichtswinkel bestimmt, den man insgemein als ein Mass für die scheinbare Grösse des Objects betrachtet.

In den ähnlichen Dreiecken AkB und akb ist $AB:ab = kC:kc$, also $ab = \frac{AB}{kC}.kc$, oder wenn man den gegebenen Abstand des Kreuzungspunkts vom Hornhaut-Scheitel h besonders einführt, $ab = kc \,.\, \frac{AB}{kh + hC}$.

Für den Gesichtswinkel $AkB = akb = x$ hat man in Bezug auf Fig. 139: $\frac{AC}{Ch + hk} = \text{tang.}\, \frac{1}{2} x$, wo bei sehr kleinem Winkel oder Bogen dieser selbst für die Tangente genommen werden darf.

Bei der wirklichen Ausführung der Rechnung kann man mit Rücksicht auf das schematische Auge den Abstand kh des Kreuzungspunktes von der Hornhaut zu 3,315 Paris. Linien = 7,4696 Millimeter, und den Abstand desselben Punktes von der Retina zu 6,735 Par. Lin. = 15,1774 Millim. nehmen, wonach einem Gesichtswinkel von 1 Secunde auf der Retina eine Länge von 0,00003265 Par. Lin. oder 0,00007357 Millim. entspricht.

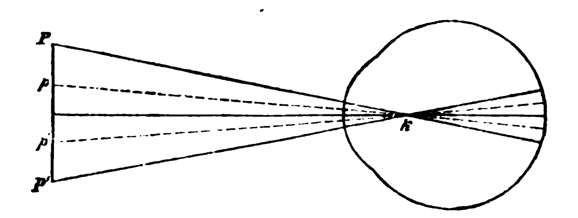
Wenn aber das Auge für die Entfernung des Objects nicht genau eingestellt ist, tritt das Netzhautbild mit Zerstreuungskreisen auf, und der Gesichtswinkel ist dann streng genommen nicht mehr bestimmbar durch die Richtungslinien, die man sich von den Endpunkten des Objects durch den Kreuzungspunkt des genau accommodirten Auges gezogen denkt. Anstatt des Kreuzungspunktes ist hier vielmehr als Scheitel des Gesichtswinkels der Punkt zu nehmen, worin die von den Mittelpunkten der Zerstreuungskreise ausgehenden geraden Linien sich schneiden. Dieser Punkt liegt, nach Bestimmungen von Helmholtz *), für die im Glaskörper verlaufenden Strahlen im Mittelpunkte des Linsenbildes der Pupille; und es lässt sich, sobald man die Entfernung desselben von der Retina und ihrer Lage nach die Mittelpunkte der Zerstreuungskreise an den Grenzen des Retinabildes kennt, auch der dem letzteren entsprechende Gesichtswinkel ermitteln.

205. Sonach ist die scheinbare Grösse eines Objects durch

*) Physiol. Optik, S. 98.

die Grösse seines Retinabildes bedingt. Und ein Object pp', das auf einem grösseren PP' liegt, erscheint uns kleiner als dieses in

Fig. 140.



demselben Masse, in welchem sein Gesichtswinkel kleiner als der des Objects PP' ist. Physiologisch genommen können wir aber, falls jede erregte Opticusfaser im Centralorgane eine besondere Empfindung liefert, sagen, dass ein grösseres Retinabild die Vorstellung eines grösseren Gegenstandes veranlassen muss, weil demselben eine grössere Anzahl erregter Nervenfasern und somit auch eine grössere Anzahl von besonderen Empfindungen entspricht.

Obschon nun, unter sonst gleichen Umständen, die Vorstellung von der Grösse eines Objects durch die Grösse seines Retinabildes bedingt ist, giebt es doch noch andere Momente, die auf diese Vorstellung einen bestimmenden Einfluss üben. Ein verhältnissmässig sehr kleines Object kann dem Auge nahe gebracht ein eben so grosses und sogar noch grösseres Retinabild liefern als ein in weiterer Ferne gelegenes viel grösseres, ohne dass wir darum beide Objecte für gleich gross nehmen; vielmehr wird uns das nähere auch in der Vorstellung kleiner erscheinen als das entferntere und wirklich grössere. Und schon hieraus lässt sich entnehmen, dass die Vorstellung der Entfernung als wirksames Moment in unsere Grössenvorstellung eingreift. Auf welche Weise wird sich später zeigen, wo wir ausführlicher darauf zurückkommen werden.

206. Im Hinblick auf bereits angestellte dioptrische Betrachtungen wollen wir uns zunächst zu den Ursachen wenden, die eine Vergrösserung des Retinabildes eines leuchtenden Objects bewirken können, nämlich über die Grenzen hinaus, welche von den durch den Kreuzungspunkt gedachten Richtungslinien bestimmt sind. Als solche Ursachen haben wir kennen gelernt: 1) die chromatische Abweichung, 2) die unvollständige Adaption des Auges und 3) die Abweichung der optischen Trennungsflächen des

Auges von der Kugelgestalt, d. h. die ungleiche Krümmung dieser Flächen in verschiedenen Schnitten.

Auf diese Ursachen lässt sich die als Irradiation bezeichnete Erscheinung zurückführen, welche im Allgemeinen ein längst bekanntes Phänomen ist, so dass sie Plateau *) von Epicur und Persius bis auf seine Zeit verfolgen konnte. Man bezeichnet mit dem Namen Irradiation (Ausstrahlung) gewöhnlich die scheinbare Vergrösserung eines hellen Objects, das von einem dunklen Raume umgeben ist, sowie auch die entsprechende umgekehrte: die scheinbare Verkleinerung eines dunklen Objects auf hellem Grunde. Betrachtet man, um ein bekanntes Beispiel anzuführen, ein Schachbrett aus verschiedenen Entfernungen, so wird man leicht finden, dass die hellen Felder bei einem gewissen Abstande grösser als die dunklen erscheinen. Eben hierher gehört auch das Ansehen des Mondes, wenn derselbe sichelförmig erscheint und zugleich der Rest der Scheibe durch schwache Beleuchtung von aschfarbenem Lichte wahrzunehmen ist. Die helle Sichel scheint dann einer merklich grösseren Scheibe anzugehören, als der dunklere Theil des Mondes. Sehr geeignet aber zur Darstellung der Erscheinung ist folgender Versuch.

Man nimmt dünne weisse Pappe, in der Form eines Rechtecks von etwa 8—9 Zoll Höhe und 6 Zoll Breite, zieht darauf zwei parallele Linien *ac* und *bd* in einem Abstande von etwa 2 bis 3 Linien und schneidet dieselben in ihrer Mitte rechtwinklig durch eine Gerade *ef*. Den Streifen *abgh* und alles Uebrige, mit Ausnahme des Streifens *ghcd* und der beiden Rechtecke *page* und *qbhf*, streicht man möglichst schwarz an, wo man dann zwei Streifen von gleicher Breite erhält: den einen *ghcd* weiss auf schwarzem Grunde, den anderen *abgh* schwarz auf weissem Grunde. Nun stelle man diese Vorrichtung neben einem Fenster senkrecht auf, und entferne sich etwa zwölf Fuss; dann wird man den weissen Streifen beträchtlich breiter als den schwarzen sehen. Auch kann man, um die Erscheinung

Fig. 141.



*) Mém. de l'acad. de Bruxelles. Tom. XI. Poggend. Ann. Ergänzungsband I, (LI. b.). S. 79, 193, 405.

noch auffälliger zu machen, die weissgelassenen Felder: *page*, *bqfh*, *ghcd* herausschneiden, hierauf die Vorrichtung an einer der oberen Scheiben eines Fensters befestigen und durch dieselbe nach dem Himmel sehen. Das Phänomen tritt dann, wegen des Contrastes des Hellen und Dunkeln, namentlich wenn die schwarze Farbe möglichst undurchsichtig ist, sehr intensiv hervor.

207. Es ist zu erwarten, dass auch beim Sehen durch astronomische Instrumente Irradiationserscheinungen mehr oder minder auffällig zu Tage treten müssen*). Zum Unterschiede von dieser Irradiation bei astronomischen Instrumenten nennt man die dem unbewaffneten Auge sich darbietende die Ocular-Irradiation.

Bevor wir nun die Ursache der Irradiation näher in Betracht ziehen, wollen wir die Resultate aufführen, zu welchen Plateau durch seine mit grosser Ausdauer fortgesetzten Untersuchungen über diesen Gegenstand gelangte.

a) Ocular-Irradiation.

1) Die Irradiation ist eine wohl festgestellte, leicht zu erweisende, sehr veränderliche, aber unter allen Umständen genau messbare Thatsache.

2) Sie zeigt sich bei jeder Entfernung des sie erzeugenden Gegenstandes, von der kürzesten des deutlichen Sehens bis zu jeder beliebigen.

3) Der Gesichtswinkel, den sie umspannt und der sie misst, ist unabhängig von der Entfernung des Gegenstandes.

4) Daraus folgt, dass die absolute Breite, welche wir ihr beilegen, bei Gleichheit aller übrigen Umstände, proportional ist der Entfernung, die zwischen dem Gegenstande und unserem Auge vorhanden ist, oder uns scheint vorhanden zu sein.

5) Die Irradiation wächst mit der Helligkeit des Gegenstandes, aber weit weniger rasch als diese. Verzeichnet man das Gesetz durch eine Curve, welche die successiven Werthe der Helligkeit von Null an zu Abscissen und die entsprechenden Werthe der Irradiation zu Ordinaten hat, so geht diese Curve durch den Anfang der Coordinaten, kehrt ihre Concavität gegen die Abscissenaxe

*) De l'Isle: Mém. de l'acad. de scienc. de Paris 1743. p. 419 u. 1755, p. 145; — Hassenfratz: Cours de physique céleste 1810. § 23. p. 23; — J. Herschel: Traité de la lumière par Verhulst et Quetelet T. I. §. 697. p. 451, 452; — Quetelet: Positions de physique. 1re Edit. 1829. T. III. p. 81.

und besitzt eine dieser Axe parallele Asymptote. Für die Helligkeit wie die des Himmels gegen Norden ist die Curve schon sehr ihrer Asymptote nahe.

6) Wenn das den Gegenstand umgebende Feld nicht völlig lichtlos ist, so wird die Irradiation geschwächt, desto mehr als die Helligkeit des Feldes sich der Gleichheit mit der des Gegenstandes nähert. Tritt diese Gleichheit ein, so verschwindet die Irradiation.

7) Daraus folgt, dass wenn zwei gleich helle Gegenstände einander berühren, die Irradiation für jeden von ihnen in dem Punkte oder der Linie der Berührung Null ist.

8) Zwei benachbarte und hinreichend nahe Irradiationen erleiden beide eine Schwächung. Diese Schwächung ist um so beträchtlicher, als die Ränder der leuchtenden Räume, von denen die beiden Irradiationen ausgehen, einander näher sind.

9) Die Irradiation nimmt zu mit der Dauer der Anschauung des Gegenstandes.

10) Bei demselben Individuum und bei einem Gegenstande von gleicher Helligkeit schwankt die Irradiation von einem Tage zum anderen.

11) Die von einer und derselben Helligkeit erregte mittlere Irradiation ist sehr verschieden von einem Individuum zum anderen.

12) Die Irradiation wird abgeändert, wenn man eine Linse vor das Auge bringt. Sie wird verringert durch convergirende Linsen, und erhöht durch divergirende.

13) Diese Wirkung der Linsen scheint nur von deren Brennweite abzuhängen, und nicht von den absoluten Krümmungen ihrer Oberflächen. Sie scheint desto stärker zu sein, je kürzer die Brennweite ist.

14) Die wahrscheinlichste Ursache der Irradiation scheint die zu sein, dass der durch das Licht erzeugte Reiz sich ein wenig über den Umriss des Bildes fortpflanzt. Mittelst dieses Satzes, der übrigens auf Thatsachen gestützt ist, kann man alle Gesetze der mit blossem Auge beobachteten Irradiation erklären; allein man stösst auf Schwierigkeiten, wenn man die Wirkung der Linsen in Betracht zieht.

b) Irradiation bei astronomischen Instrumenten.

15) Der Fehler bei astronomischen Beobachtungen, erzeugt durch das, was man hier Irradiation genannt hat, entspringt aus zwei wesentlich verschiedenen Ursachen: der Ocular-Irradiation und den Abirrungen des Fernrohres.

16) Bei diesem Gesammtfehler ist der von der Ocular-Irradiation herrührende Theil abhängig von der Vergrösserung an sich, von der Helligkeit des Gegenstandes und von dem Auge des Beobachters. Er wird übrigens bedeutend verringert durch die Wirkung, welche das Ocular des Fernrohrs als eine vor das Auge gebrachte Sammellinse ausübt; und diese Verringerung ist wahrscheinlich desto grösser, je kräftiger das Ocular ist. In dem, was das Auge des Beobachters betrifft, muss die Wirkung verschieden sein von einer Person zur anderen, und, für eine und dieselbe Person, von einer Zeit zur anderen.

17) Dieser nämliche Theil des Gesammtfehlers verschwindet bei den Beobachtungen, wo man ein Mikrometer mit doppeltem Bilde anwendet.

18) Der andere Theil des Gesammtfehlers, d. h. der aus der Abirrung des Fernrohrs entspringende Theil, ist nothwendig verschieden in verschiedenen Instrumenten; allein für ein und dasselbe Fernrohr kann er als nahe constant betrachtet werden.

19) Der Irradiationseffect bei Fernröhren oder der Gesammtfehler, herrührend von der Ocular-Irradiation und den Abirrungen des Instruments, ist nothwendig veränderlich, weil er von veränderlichen Elementen abhängt. Es wird in gewissen Fällen unmerklich, und in anderen sehr beträchtlich werden können.

20) Selbst mit einem mittelmässigen Fernrohre und einem sehr zur Irradiation geneigten Auge ist es möglich, mit Hülfe gewisser Verfahrungsarten Resultate zu erhalten, die man als frei von diesem Gesammtfehler betrachten kann.

208. In Bezug auf die vorstehenden Sätze hat man erkannt, dass Plateau die Irradiation naher Objecte von derjenigen entfernter nicht unterschieden hat *). Als man dies erkannte, ergab sich auch, dass das unter 3) aufgeführte Gesetz diesseits der deutlichen

*) s. Fliedner, Poggend. Ann. Bd. LXXXV. S. 321, 460 u. Bd. LXXXVIII. S. 29.

Sehweite nicht giltig ist; die scheinbare Breite der Irradiation nimmt dann nicht ab, wie es dieses Gesetz ausspricht, sondern im Gegentheil zu. Das 12) Gesetz gilt nur für nahe Objecte; für ferne Objecte ist die Erscheinung die umgekehrte, d. h. die Irradiation wird durch convergirende Linsen erhöht und durch divergirende vermindert. Plateau bezieht aber dieses Gesetz, obschon es aus der Betrachtung dicht vor dem Auge befindlicher Objecte abgeleitet ist, schlechthin auf die Irradiation ferner Objecte, wie er denn alle seine Beobachtungen nur mit jenseits oder in der deutlichen Sehweite liegenden Objecten angestellt zu haben scheint, mit Ausnahme derer, wobei er Linsengläser gebrauchte.

Als wahrscheinliche Ursache der Irradiation bezeichnet Plateau die Ausbreitung des Lichteindruckes über die Umrisse des Retinabildes hinaus, eine Ansicht, die schon Descartes *) ausgesprochen hat und eine Zeit lang fast allgemeinen Beifall fand. Plateau blieb bei dieser Ansicht stehen, obgleich sie ihm (s. S. 315, N. 14) im Hinblick auf die Wirkung der Linsen Schwierigkeiten bereitete. Allerdings findet wohl bei dieser Erscheinung eine Ausbreitung des Lichtreizes über das in obiger Weise (§. 204) geometrisch bestimmte Retinabild statt, d. h. in Folge einer Ausbreitung des eindringenden Lichtes, nicht aber physiologisch so, dass die von Seiten des Lichtes wirklich afficirten Retinapunkte ihre Erregungszustände auf die benachbarten nicht vom Lichte getroffenen Stellen übertragen. Wie ein Druck auf ein gespanntes Tuch rings um die gedrückte Stelle eine Einbiegung verursacht, so etwa sollte, nach dieser Ansicht, die Wirkung des Lichtes sich rings auf die Umgebung der unmittelbar von ihm getroffenen Stellen erstrecken **). Die Unzulänglichkeit einer derartigen Ansicht ist in neuerer Zeit, wo von verschiedenen Seiten her Einwände gegen dieselbe erhoben wurden ***), vollständig erwiesen.

209. Nach einer Bemerkung von Plateau scheint Arago

*) La dioptrique, Leyde 1637, discours sixième p. 67 f.

**) s. Poggend. Ann. Bd. XXVII. S. 490, Bd. XXIX. S. 339.

***) Powell, Philosophic. Magaz. Ser. III. T. XXXIV. 1849; — Trouessart, Comptes rendus etc. 1852. p. 4; — Vallée, Compt. med. 1852. p. 19; — H. Meyer, Poggend. Ann. Bd. LXXXIX. S. 540; — Welcker, über Irradiation u. einige andere Erscheinungen des Sehens. Giessen, 1852.

die unvollkommene Achromasie des Auges als Grund der Irradiation angesehen zu haben*), obschon nicht erhellt, in welcher Weise.

Wir wissen aber (§. 191), dass die von einem weissen Objectpunkte kommenden Strahlen, selbst bei möglichst vollständiger Adaption des Auges, nicht in einem einzigen mathematischen Punkt auf der Retina zur Vereinigung kommen können, sondern dass statt des letzteren ein kleiner weisser Zerstreuungskreis entsteht. Wenn sonach jedem Objectpunkte ein weisser Zerstreuungskreis auf der Retina entspricht, kann es nicht ausbleiben, dass das Bild eines weissen Objects in das Bild des dunklen Umgebungsraumes hineinragt und daher grösser erscheint, als es der Fall sein würde, wenn die von einem einzelnen Objectpunkte kommenden Strahlen in einem einzigen Punkte der Retina ihre Vereinigung fänden. Beruht aber die Irradiation in solcher Weise auf der chromatischen Abweichung des Auges, so muss sie mit Erweiterung der Pupille zunehmen, wofür A. Fick **) folgende empirische Beweise beigebracht hat. Man stellt eine feine Spalte, die etwa mit einem Federmesser in ein Stück Carton geschnitten ist, vor einer Lampenflamme auf, und sieht mit einem Auge, das für die Entfernung des Spaltes adaptirt ist, nach der so gebildeten Lichtlinie, die ungeachtet der vollständigen Adaption des Auges verbreitert erscheinen wird. Hierauf bringt man hinter die Lampe einen Spiegel, in der Art, dass derselbe neben dem Schirm (mit der Spalte) vorbei noch eine beträchtliche Lichtquantität ins Auge reflectiren kann; dann wird das verbreiterte Bild der Lichtlinie schmäler, indem sich die Pupille, wegen des in grösserer Menge einfallenden Lichtes, verengert. Bedeckt man aber den Spalt vor der Lampenflamme mit einem fast nur homogenes Licht durchlassenden Glase, wozu das gewöhnlich im Handel vorkommende hochrothe Glas genügt; so erscheint die nun homogen gefärbte Lichtlinie nicht mehr abwechselnd breiter und schmäler, falls die Pupille bei abwechselndem Zutritt von seitlichem Lichte abwechselnd weiter und enger wird. Ist nur die Hälfte der Länge des Spaltes mit dem rothen Glase bedeckt, so hat man zwei gleich breite Objecte: ein monochromatisches (rothes) und ein weisses, welches letztere merklich

*) Moigno, Répertoire d'Optique moderne. T. II. p. 609.
**) Medic. Phys. S. 323.

breiter als jenes erscheint. — Endlich sehe man durch zwei feine Oeffnungen in einem dicht vor das Auge gehaltenen Schirme nach dem zur Hälfte seiner Länge mit dem rothen Glase bedeckten Lichtspalte, und zwar so, dass die Verbindungslinie beider Oeffnungen senkrecht steht auf der Ebene, die den Spalt und Augenmittelpunkt enthält, und dass sie selbst, die Oeffnungen, gleich weit zu beiden Seiten von der Gesichtsaxe abstehen. Liegt der Spalt horizontal, so muss die eine Oeffnung am oberen, die andere am unteren Rande der Pupille stehen. Bei dieser Beobachtungsweise erscheint die unverdeckte Hälfte des Spaltes nicht mehr blendend hell, womit der Einwand wegfällt, dass die Seele das Verhältniss von sehr hellen zu lichtarmen Objecten nicht unbefangen beurtheile. Auch soll dieselbe, — falls nur die Oeffnungen so weit als thunlich auseinander liegen, — noch den Vortheil gewähren, dass man, wegen der bedeutenden Erweiterung der Pupille, Randstrahlen benutzen kann, die der chromatischen Abweichung vorzugsweise unterworfen sind. Bei einem Accommodationszustande für zu grosse Nähe sieht man nun zwei Spectra, deren rothe Enden einander zugekehrt sind, während der rothe, verdeckte Theil des Spaltes nicht zu einem Spectrum ausgedehnt erscheint. Nähert man aber das Auge so weit, dass beide Spectra zusammenfallen, so erblickt man neben dem schmäleren rothen Streifen einen breiteren weissen, also ein nicht irradiirendes monochromatisches und ein irradiirendes weisses Object.

So kann also, weil die von einem weissen Objectpunkte kommenden Lichtstrahlen, selbst bei wohl accommodirtem Auge, nicht punktuell, sondern in einen kleinen Zerstreuungskreis vereinigt werden, eine Irradiationserscheinung bewirkt werden, die freilich unter gewöhnlichen Umständen, namentlich bei enger Pupille, nicht sehr merklich auffallen kann.

210. Ein zweiter Umstand, der eine Vergrösserung des Netzhautbildes eines hellen Objects veranlassen kann, ist die unvollständige Adaption des Auges, die, wie wir wissen, oft Zerstreuungskreise von beträchtlicher Ausdehnung mit sich bringt, mag übrigens das helle Object auf dunklem Grunde weisses oder homogenes Licht aussenden, obwohl allerdings der Durchmesser der einzelnen Zerstreuungskreise für weisses Licht, wie es mit Rücksicht auf das Vorstehende (§. 209) als gewiss erscheint, noch grösser ausfallen

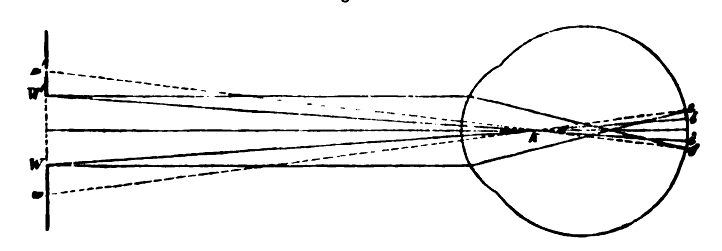


muss. Schon Kepler *) sah die Ursache der Irradiation gewissermassen in einer mangelhaften Adaption des Auges, und zwar eben insofern, als hierdurch die Grenzen des Bildes auf der Retina erweitert werden. Die vom Auge aufgefangenen Lichtstrahlen vereinigen sich nach ihm, wenn ein leuchtender Punkt jenseits einer gewissen, für jedes Individuum bestimmten Entfernung gebracht wird, vor der Netzhaut, gehen dann wieder auseinander und malen auf diese Haut nicht einen Punkt, sondern eine kleine Scheibe. Diese Ausbreitung der Lichtpinsel müsse offenbar die Grenzen der Bilder auf der Netzhaut erweitern.

Diese Ansicht, der man sich neuerdings fast allgemein zugewendet hat, erklärt sehr wohl die gewöhnlichen vorkommenden Irradiationserscheinungen, so namentlich die scheinbare Vergrösserung eines hellen Objects auf dunklem Grunde in den bereits anfänglich (§. 206) mitgetheilten Fällen.

Es sei in Figur 142 WW' ein weisser Streifen auf dunklem Grunde. Bei vollständiger Adaption des Auges für die

Fig. 142.



Entfernung dieses Streifens würde deßsen Retinabild (oder Gesichtswinkel) durch die von seinen Endpunkten durch den Kreuzungspunkt k gezogenen Richtungslinien Wi und $W'i$ bestimmt sein. Ist aber das Auge für eine geringere Entfernung eingestellt, so werden die von den Objectpunkten W, W' ausgehenden Strahlen sich vor der Retina schneiden und auf dieser Zerstreuungskreise bilden, die über die Grenzen des bei wohl adaptirtem Auge entstehenden Bildes ii' hinausgreifen, etwa bis e und e'. Unter diesen Umständen wird der Streifen WW', wegen des grösseren Retina-

*) Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur. Frankfurt 1604. p. 217, p. 199, prop. XXVI. u. p. 200, prop. XXVII. — Vergl. Welcker, über Irradiation etc. Giessen 1852.

bildes, gewiss in grösserer Ausdehnung als sonst erscheinen müssen. Den Punkten *e*, *e'* im Retinabilde entsprechen weisse Punkte im Gesichtsfelde, die man erhält, wenn man von *e* und *e'* die Richtungslinie *ew* und *e'w'* zieht. So erscheint nun der weisse Streifen *WW'*, vermöge seines durch Zerstreuungskreise vergrösserten Retinabildes, beiderseits in das Dunkle hineinragend, in der grösseren Ausdehnung *ww'*. — In ganz ähnlicher Weise resultirt die Erscheinung, wenn das Auge für eine grössere Entfernung adaptirt ist, und daher die von dem näher gelegenen weissen Object kommenden Strahlen erst hinter der Retina zur Vereinigung streben.

211. Wir wollen hier noch erwähnen, dass auch Dove *) die Ursache der Irradiation in dem Adaptionsvermögen des Auges suchte, jedoch in folgender Weise. Derselbe stützt sich auf den Satz, dass die Adaption des Auges für einen Gegenstand bei verschiedenfarbiger Beleuchtung eine verschiedene ist. So müssen in blauer Beleuchtung Gegenstände, um deutlich gesehen zu werden, näher gestellt werden, als in rother (§. 194). Das Analogon hierzu ist das Betrachten der Gegenstände mit blossem Auge in verschiedenen Zuständen der Helligkeit. Die Adaption des Auges verändert sich, wenn es dieselbe Farbe in verschiedener Intensität sieht, in derselben Weise, als wenn es verschiedene Farben von gleicher Intensität betrachtet, und zwar verhält sich das Hellere zum Dunkleren, wie eine mehr brechbare Farbe zu einer weniger brechbaren. Nun unterscheiden sich Schwarz und Weiss nur quantitativ als grösstmögliche Unterschiede der Helligkeit. Ein dunkler Gegenstand wird aber unter ähnlichen äusserlich sichtbaren Veränderungen des Auges gesehen wie ein fernerer, ein weisser wie ein näherer; nämlich die Pupille erweitert sich, wie wir wissen, im Dunklen und zieht sich bei wachsender Helligkeit zusammen; sie ist aber auch beim Betrachten näherer Objecte kleiner, als wenn man einen entfernteren scharf beobachtet. Wie nun in der Entfernung des deutlichen Sehens durch ein violettes Glas, welches die Enden des Spectrums durchlässt, aber seine Mitte auslöscht, eine Lichtflamme ohne Saum violett, d. h. die rothe Flamme so gross als die blaue erscheint, so erscheint auch in der Entfernung des deutlichen Sehens ein weisser Gegenstand so gross wie ein schwarzer.

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXIII. S. 182, sowie Darstellung der Farbenlehre etc. Berlin 1853. S. 178.

In grösserer Entfernung umsäumt dagegen ein blauer Rand die rothe Flamme, d. h. die blaue Flamme erscheint grösser als die rothe. Und ebenso erscheint ein weisser Streif auf schwarzem Grunde jenseits der deutlichen Sehweite grösser als ein schwarzer auf weissem Grunde. Hiernach beruht also die Irradiationserscheinung darauf, dass für eine gegebene Entfernung die Adaption des Auges für weisse Gegenstände eine andere ist als für schwarze.

212. Indessen hat Cramer*) zur Stütze der Ansicht, dass die Irradiation vorzugsweise in mangelhafter Accommodation begründet sei, durch mehrere Versuche dargethan, dass gar oft selbst dann, wenn eine Irradiation bei richtiger Accommodation zu bestehen scheint, doch wirklich die Accommodation mangelhaft ist. Zu diesen Versuchen wurde eine Vorrichtung benutzt, die es gestattete, zwischen das Auge und den betreffenden Gegenstand plötzlich eine Convexlinse und ein Kartenblatt mit zwei feinen Oeffnungen zu bringen, nachdem zuvor schon ein Spinnenfaden in einer Entfernung vom Auge ausgespannt war, dass die nachher eingeschaltete Linse ein virtuelles Bild dieses Fadens bewirkte, das eben so weit vom Auge abstand als der irradiirende Gegenstand, für den das Auge vollkommen eingestellt sein sollte. Der Versuch zeigte nun, dass im Falle der Irradiation sofort nach Einschaltung der Linse und des Kartenblattes das virtuelle Bild des Fadens doppelt erschien, was nach dem Scheiner'schen Versuche andeutet, dass das Auge nicht für die Entfernung des virtuellen Bildes, und daher auch nicht für die des irradiirenden Gegenstandes eingestellt war.

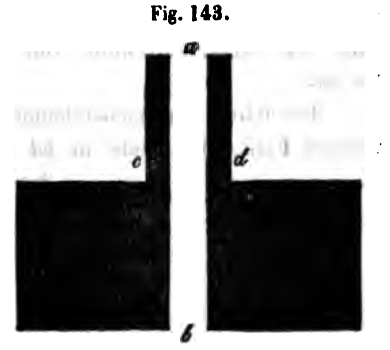
213. Volkmann**), der die Irradiationserscheinungen neuerdings einer Prüfung unterwarf, fand, dass unter Umständen auch schwarze Objecte auf weissem Grunde zu breit erscheinen können. Klebt man zwei schwarze Papierstreifen von 5 Millimeter Breite auf eine weisse Tafel parallel nebeneinander, dergestalt, dass zwischen ihnen ein weisser Raum von 8 Millimeter übrig bleibt, und betrachtet dann die Tafel aus zu grosser Entfernung oder mittelst einer Convexbrille, die das in das Auge fallende Licht zu stark bricht, so erscheinen die 5 Millimeter breiten schwarzen Streifen

*) Prager Vierteljahrschrift. 12. Jahrgang. Bd. IV. S. 50.

**) Berichte über die Verhandlungen der königl. Sächs. Gesellsch. der Wissenschaften in Leipzig. Math. Phys. Klasse. IX. Bd. 1857. S. 129.

breiter als der 8 Mill. breite weisse, welchen sie einfassen. Folgende Versuche Volkmann's zeigen eine Abhängigkeit des Phänomens von den Dimensionen der schwarzen Objecte. Man klebt auf einen schwarzen Grund einen weissen Papierstreifen von 8^{mm} Breite und auf einen weissen Grund zwei schwarze Papierstreifen von 5^{mm} Breite in der Weise parallel nebeneinander, dass zwischen ihnen ein freier Raum von 8^{mm} Breite übrig bleibt. So hat man zwei weisse Streifen von gleicher Breite, die sich nur durch die Breite ihrer schwarzen Einfassung unterscheiden; und es erscheint, wenn man diese Streifen aus einer die Accommodationsgrenze überschreitenden Entfernung betrachtet, der auf schwarzem Grunde liegende Streifen merklich breiter als der andere nur von schmalen schwarzen Streifen begrenzte. Scharfsichtige Personen müssen sich, um die Erscheinung wahrzunehmen, einer starken Convexbrille bedienen, damit eine unvollständige Vereinigung des Lichtes auf der Netzhaut erzielt werde. In nächster Beziehung mit diesem Versuche steht der folgende, zu dem Volkmann eine Tafel benutzte, auf welcher Schwarz und Weiss so vertheilt waren, wie es nebenstehende Figur zeigt. Der weisse Streifen *ab* hatte eine gleichmässige Breite von 8^{mm}, während die schmalen schwarzen Grenzstreifen seiner oberen Hälfte *cd* 3^{mm} breit waren. Nun erschien in einer gewissen Entfernung der weisse Streifen in Gestalt einer Keule, deren dünnes Ende zwischen den schmalen schwarzen Säumen und deren dickes zwischen den beiden schwarzen Grundflächen lag.

Fig. 143.



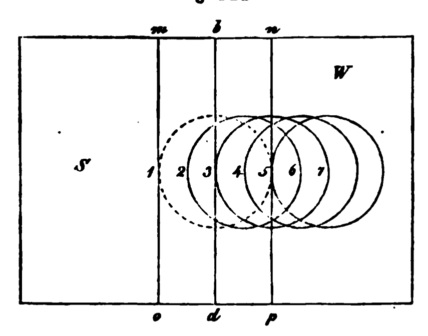
Volkmann glaubt das Gesetzliche der hierher gehörigen Erscheinungen in folgendem Satze aussprechen zu können: Ist der Durchmesser des schwarzen Netzhautbildes kleiner als der Halbmesser des Zerstreuungskreises der Lichtstrahlen, von welchen die Irradiation abhängt, so erfährt das Schwarze auf Kosten des Weissen eine Verbreiterung.

214. Im Hinblick auf die Erklärung dieser Erscheinungen erinnert Volkmann zunächst daran, dass die Intensität des ins Auge fallenden Lichtes bei unvollkommener Vereinigung desselben

in gleichem Masse abnimmt, als die Grösse der Zerstreuungskreise wächst. Natürlicher Weise kann beim Betrachten einer ausgedehnten weissen Fläche, selbst bei mangelhafter Accommodation, keine durch Zerstreuungskreise bedingte Verminderung der Lichtstärke wahrgenommen werden, weil die allerdings auch hier entstehenden Kreise sich dergestalt decken, dass der Lichtverlust, den ein Punkt durch Irradiation auf benachbarte Punkte erfährt, durch die Irradiation von Seiten der Nachbarschaft auch wieder ersetzt wird. Dagegen kann ein solcher Ersatz an der Berührungsgrenze von Weiss und Schwarz nicht stattfinden; der Rand des Weissen gibt (im Netzhautbilde) Licht an das benachbarte Schwarz ab, ohne von letzterem solches zu erhalten. Indem nun das Weiss, wo es an das Schwarz grenzt, Licht verliert und das angrenzende Schwarz Licht gewinnt, entsteht zwischen Weiss und Schwarz ein grauer Raum, den man mit Volkmann den Irradiationsraum nennen kann. Die Lichtstärke desselben nimmt von der Seite des Weissen gegen das Schwarze hin ab, und zwar, wie sich ohne merklichen Fehler wohl annehmen lässt, gleichmässig, selbst bei weissem Lichte, so lange die Lichtzerstreuung von keiner Farbenzerstreuung begleitet ist.

Bezeichnet in nachstehender Figur *S* ein schwarzes, *W* ein weisses Feld, die beide in *bd* aneinander grenzen, und 3 einen

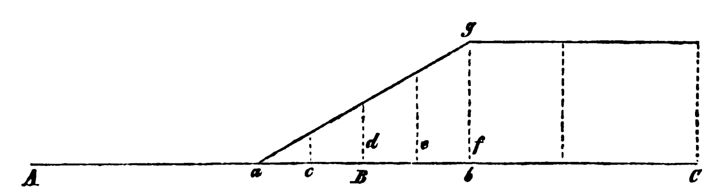
Fig. 144.



leuchtenden Punkt der Grenzlinie, dessen Zerstreuungskreis durch den punktirten Kreis angedeutet ist; so wird die Fläche *mnop* der Irradiationsraum sein, der von den Zerstreuungskreisen sämmtlicher in *bd* liegenden weissen Punkte gebildet ist. *mbdo* ist aber der Raum, worin das schwarze Feld Licht gewinnt, und *bnpd* derjenige, in welchem das weisse Feld Licht verliert.

Die Veränderung der Lichtintensität im Irradiationsraume lässt sich erkennen, wenn man die Uebereinanderlagerung der Zerstreuungskreise einer Reihe leuchtender Punkte in Betracht zieht. So wird im schwarzen Felde der Raum zwischen 1 und 2 nur vom Zerstreuungskreise des Punktes 3, der zwischen 2 und 3 durch zwei sich hier deckende Zerstreuungskreise beleuchtet, während im weissen Felde zwischen 3 und 4 drei Kreise zur Deckung kommen, u. s. f. Man kann diese Veränderung der Lichtintensität im Irradiationsraume bequem durch eine graphische Darstellung veranschaulichen.*) Sei *AB* in nachstehender Figur die Breite des


Fig. 145.



weissen, *BC* die des schwarzen Streifens, *ab* die Breite des Irradiationsraumes; ferner seien *a*, *c*, *d*, *e*, *f* die Ordinaten der Lichtstärke. Dann soll die Gerade *ga* die Progression der Lichtabnahme im Irradiationsraume darstellen. Man erkennt sofort, dass die Grösse des Winkels, den diese Gerade mit der Abscissenaxe *AB* macht, zunimmt: einmal mit der Vergrösserung von *gb*, d. h. mit der Differenz der Lichtintensität im hellen und im dunklen Felde, und dann mit der Verkleinerung von *ab*, d. h. mit der Verminderung der Lichtzerstreuung.

215. Die Lichtintensität nimmt im Irradiationsraume von 4 nach 1 hin (Fig. 144) stetig ab; und so sollte sich dieser Raum auch in der Vorstellung mit abgestufter Helligkeit darbieten. Die Netzhautelemente, auf welche sich der im schwarzen Felde gelegene Theil des Irradiatiationsraumes darstellt, werden von zerstreutem weissem Lichte afficirt, dessen Intensität von 3 nach 1 hin abnimmt. Gewiss wird dieses Netzhautareal um so sicherer die Empfindung des Weissen und darum eine Verbreiterung des weissen Feldes gewähren, je dunkler das Schwarz, oder mit anderen Worten, je grösser die Helligkeitsdifferenz zwischen dem schwarzen und weissen Felde ist.

*) s. Volkmann a. a. O. S. 133.

Da aber die Intensität des zerstreuten weissen Lichtes im Raume von 3 nach 1 hin abnimmt, so muss in der Vorstellung des Irradiationsraumes der Uebergang vom vollkommenen Weiss zum vollkommenen Schwarz durch ein an das letztere grenzendes Halbdunkel vermittelt sein, das je nach dem Masse der Lichtzerstreuung mehr oder minder breit sein kann. Wenn sich nun der Irradiationsraum als ein Halbdunkles von seiner beiderseitigen (schwarzen und weissen) Umgebung unterscheidbar absetzt, dann kann es geschehen, dass das aneinandergrenzende Weisse und Schwarze beide an Breite verlieren. Als Grundbedingung hierzu betrachtet Volkmann eine beträchtliche Zerstreuung des Lichtes im Auge, während sie da, wo das Weisse auf Kosten des benachbarten Schwarz vergrössert erscheint, keine übermässig grosse sein darf. Die gleichzeitige Verschmälerung des Weissen und Schwarzen lässt sich bei starker Lichtzerstreuung wahrnehmen, wenn man weisse und schwarze Streifen von gleicher Breite durch eine starke Convexbrille oder bei kurzsichtigem Auge ohne Brille aus einer gewissen Entfernung betrachtet. Die beträchtliche Zerstreuung bedingt diese Erscheinung insofern, als mit der Grösse der Zerstreuungskreise auch die Breite des Irradiationsraumes und hiermit seine Unterscheidbarkeit wächst. Dieselbe ist aber auch noch abhängig von der Schnelligkeit der Lichtabnahme im Irradiationsraume. Ist diese Abnahme eine sehr allmälige und demgemäss der Unterschied der Lichtintensitäten der aneinander grenzenden hellen und dunklen Streifen sehr gering, so wird der Unterschied der Beleuchtung zwischen dem Irradiationsraume und Nachbarstreifen noch geringer sein; daher denn die Existenz des Irradiationsraumes, namentlich wenn er zugleich sehr schmal ist, nicht bemerklich sein kann. Sonach würde das Auftreten eines discreten, die beiden Nachbarfelder beschränkenden Irradiationsraumes durch Zunahme des Lichtunterschiedes beider Felder begünstigt, womit auch die Erfahruug stimmt, dass in derselben Entfernung, worin nebeneinander befindliche weisse und schwarze Streifen eine gleichzeitige Verschmälerung darbieten, graue und schwarze Streifen einen solchen nicht oder nur in geringem Masse zeigen. Indess vermuthet Volkmann, dass die Zunahme der Lichtdifferenz das Phänomen nur bis zu einem gewissen Punkte begünstige, über denselben hinaus gesteigert dagegen verhindere, indem die Seele, präoccupirt von dem Eindrucke des starken Contrastes, nicht zur

Wahrnehmung des vom Irradiationsraume ausgehenden geringeren Reizes gelange.

216. An demselben Phänomen hebt Volkmann *) noch einige Seiten hervor, die ihm aus dem aufgestellten Erklärungsprincip nicht sofort begreiflich erschienen. Bei beträchtlicher Breite des Irradiationsraumes findet sich nämlich, dass die grauen Säume, die jeden schwarzen und weissen Streifen auf beiden Seiten einfassen, von ungleicher Lichtstärke sind. Die Säume des weissen Streifens sind nicht allein heller als die des schwarzen, was nichts Auffallendes bietet, sondern jeder Streifen zeigt auf der einen Seite einen helleren, auf der anderen einen dunkleren Saum, und zwar ist der Unterschied der Lichtintensität in den Säumen des weissen Streifens merklicher als in denen des schwarzen.

Wo möglich noch räthselhafter, schreibt Volkmann, ist Folgendes: „Wenn die Irradiation so bedeutend wird, dass der Durchmesser der Zerstreuungskreise die Breite der benachbarten schwarzen und weissen Streifen übertrifft, so fangen die grauen Säume derselben an ineinander zu greifen und es entsteht, wo dies Uebergreifen stattfindet, im objectiv weissen, scheinbar grauen, Streifen: Schwarz, und im objectiv schwarzen, scheinbar ebenfalls grauen, Streifen: Weiss. Wenn die Irradiation fortwährend wächst, so werden die sich deckenden Partien der grauen Säume immer breiter, mit anderen Worten: der durch Irradiation bedingte schwarze Streifen in der Mitte des objectiv weissen, und der in gleicher Weise bedingte weisse Streifen in der Mitte des objectiv schwarzen, wird immer breiter und verdrängt endlich das Bild des objectiv begründeten vollständig. Die grauen Säume sind hiermit verschwunden, und die schwarzen Streifen sind weiss, die weissen dagegen schwarz geworden."

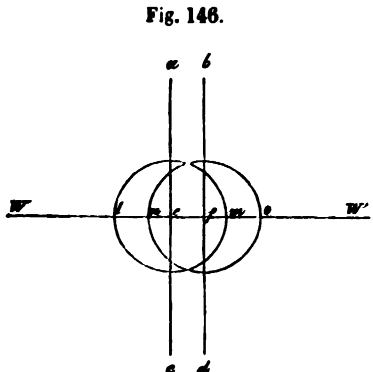
Ich habe diese Versuche wiederholt mit weissen und schwarzen Streifen, die nach Volkmann's Angabe nicht über 5—8 Millimeter breit waren. Zunächst benutzte ich drei weisse Streifen von etwa 6mm Breite, die durch zwei ebenso breite schwarze getrennt waren, alsdann fünf weisse Streifen, getrennt durch vier zwischenliegende schwarze von gleicher Breite. Allerdings sah ich nun zuweilen das Phänomen ganz so, wie es Volkmann beschreibt, z. B. bei fünf weissen Streifen mit vier zwischenliegenden schwar-

*) a. a. O. S. 185 ff.

zen: fünf schwarze Streifen statt vier, und vier weisse statt fünf; allein noch öfter bemerkte ich, je nach der Entfernung, eine Veränderung (resp. Zunahme) der weissen und schwarzen Streifen ganz in der Art und Weise, wie sie durch die Discontinuität der Zerstreuungskreise in Folge durchsichtiger Unregelmässigkeiten der Augenmedien (S. 305 ff.) bedingt ist; und es scheint mir fast, als ob hier eine Complication der Irradiation mit jener Discontinuität der Zerstreuungskreise vorliege, welche letztere bei mangelhafter Accommodation nicht allein beim Sehen mit einem Auge, sondern auch beim Gebrauch beider Augen, mit und ohne Brille, sehr wohl bemerkbar und höchst wahrscheinlich den meisten Augen eigen ist. Bei den obigen Versuchen benutzte ich eine Convexbrille, da ich ohne solche mich, unter Beeinträchtigung der Deutlichkeit, zu weit von den Objecten entfernen musste, um die Erscheinung überhaupt wahrnehmen zu können.

217. Was nun den von Volkmann hervorgehobenen Fall betrifft, wo das Schwarze sich auf Kosten des benachbarten Weissen vergrössert, so macht sich derselbe, wie bereits erwähnt, geltend, wenn der Radius der Zerstreuungskreise des Lichtes grösser als die Breite des schwarzen Objects ist. In nebenstehender Figur bezeichne *abcd* einen schwarzen Streifen, begrenzt von den weissen Feldern *W* und *W'*; zwei in den Grenzlinien *ac* und *bd* gelegene leuchtende Punkte *e* und *f* bewirken Zerstreuungskreise, deren Durchmesser *lm* und *no* doppelt so gross als die Breite des schwarzen Streifens *ef* sind. Man erkennt nun sofort, dass der schwarze Streifen von zwei Seiten her Licht empfängt und also doppelt beleuchtet wird, während denjenigen Partieen der weissen Felder, welche Licht verlieren, nämlich den Partieen zwischen *n* und *e* auf der einen Seite, und zwischen *f* und *m* auf der anderen, ein Theil ihres Lichtverlustes durch die Irradiation des gegenüberliegenden weissen Feldes ersetzt wird. Unter diesen Umständen wird nun das Schwarze

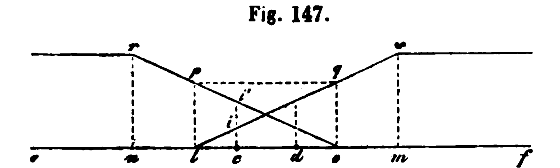
Fig. 146.



als ein verbreitertes Grau erscheinen müssen, was sich nach Volkmann auf folgende Weise erläutern lässt.

cd (Fig. 147) sei der Ort des schwarzen Streifens, *ec* der Raum des weissen Feldes *W* und *df* der Raum des anderen weissen

Fig. 147.



Feldes *W'*. Die Ordinaten *nr*, *ms* bezeichnen die Intensität des weissen Lichtes und *sl*, *ro* sind zwei Gerade, welche die Abnahme des Lichtes in den zugehörigen Irradiationsräumen vorstellen sollen (§. 214, Fig. 145). Nun findet sich die Lichtintensität in dem von zwei Seiten her (durch Irradiation) bestrahlten Raume *lo*, wenn man überall die demselben Punkte entsprechenden Ordinaten der beiden Beleuchtungen summirt, so z. B. für den Punkt *c* die Ordinaten *ci* und *ci'*, u. s. f., wo dann die für jeden Punkt dieses Raumes in einerlei Richtung aneinandergefügten Ordinaten durch die Linie *pq* begrenzt werden, die somit in Bezug auf die benachbarten Räume, deren Lichtintensitätsabnahme durch *rp*, *sq* vorgestellt ist, den Verlauf der Lichtstärke im Raume *lo* charakterisirt. Dieser Raum, breiter als der objectiv gegebene schwarze *cd*, ist nicht schwarz, nicht weiss, sondern grau, d. h. der schwarze Streifen muss beträchtlich heller und auf Kosten der weissen Umgebung breiter erscheinen.

Aus dem Vorstehenden folgt noch, dass, wenn beim Betrachten eines nicht zu breiten schwarzen Streifens der Radius der weissen Zerstreuungskreise (s. Fig. 146) dem Durchmesser des schwarzen Streifens gleich ist, nur eine Verblassung, nicht aber eine Verbreiterung desselben eintreten kann. Endlich kann auch die wirklich eintretende Vergrösserung eines Objects der Wahrnehmung völlig entgehen, wenn sie im Verhältnisse zur Breite des Objects zu gering ist.

218. Nach früheren Betrachtungen findet selbst bei möglichst wohl accommodirtem Auge eine Zerstreuung des Lichtes auf der Retina statt, einmal wegen der unvollständigen Achromasie des Auges (§. 191) und dann wegen der ungleichen Krümmung d[illegible] rechenden Flächen in verschiedenen Schnitten, obschon auch b[illegible]

einer rein sphärischen Gestalt dieser Flächen eine Zerstreuung des Lichtes unvermeidlich sein würde (§. 195 f.). Hervorgehoben seien hier noch einige Irradiationsversuche Volkmanns*), aus welchen zu entnehmen ist, dass Linien, mögen sie eine horizontale oder vertikale Lage haben, selbst in der passendsten Sehweite im Retinabilde verbreitert werden. Zu diesem Versuche diente ein Schraubenmikrometer von nachstehender Einrichtung. Zwei Silberdrähte von nur 0,0145^{mm} Durchmesser sind parallel nebeneinander so aufgespannt, dass mittelst einer Schraube der eine Faden (Draht) dem anderen bis zur Berührung genähert werden kann. Der Kopf der Schraube, durch dessen einmalige Umdrehung der bewegliche Faden um 0,5^{mm} verschoben wird, ist mit einer grossen an ihrem Rande getheilten Scheibe verbunden, deren Theilstriche 0,01^{mm} angeben. Das Intervall zwischen zwei Theilstrichen ist aber so gross, dass es die Abschätzung von Zehntheilen erlaubt; daher die Distanz der Drähte bis auf 0,001^{mm} bestimmt werden kann. Nun werden die beiden Drahtfäden gegen den Hintergrund einer weissen Wolke betrachtet als schmale schwarze Streifen und die zwischen ihnen befindliche Distanz weiss erscheinen, während man dieselben bei auffallendem Lichte vor einem schwarzen Hintergrunde umgekehrt weiss und ihre Distanz schwarz sehen wird.

Der Beobachter bringt nun die Vorrichtung in die Entfernung vom Auge, in welcher ihm die Fäden am deutlichsten erscheinen, und sucht dann durch Drehung der Schraube den parallelen Fäden eine Distanz zu geben, die dem scheinbaren Durchmesser der Fäden gleichkommt. Die Versuche, in solcher Weise von verschiedenen Personen angestellt, führten zu dem Resultate, dass die Distanz immer viel grösser hergestellt wird, als es der wirkliche Durchmesser der Fäden (Drähte) erfordert. Und der Grund liegt eben in der Irradiation, durch welche die Bilder der Fäden verbreitert werden.

219. Diese durch Lichtzerstreuung herbeigeführte Verbreiterung des Drahtbildes, die dem Durchmesser eines Zerstreuungskreises gleichkommt, lässt sich durch eine einfache Rechnung ermitteln. Da man nämlich den Abstand des Kreuzungspunktes der Richtungslinien von der Hornhaut und Netzhaut kennt, so ergibt sich leicht (s. §. 204) die Grösse des Netzhautbildes eines Objects.

*) a. a. O. S. 139 ff.

Nun liegt der genannte Punkt in der Axe des Auges 7^{mm} hinter dem Hornhautscheitel und 15^{mm} vor der Netzhaut. Daher kann man sowohl den Durchmesser des Netzhautbildes der Mikrometerfäden als auch die Entfernung der Axe des einen Fadens von der Axe des anderen im Netzhautbilde berechnen. Bezeichnet man diese Entfernung durch ε, die Distanz der durch Irradiation verbreiterten Fadenbilder mit δ, und die halbe Breite eines solchen Bildes mit ϱ; so ist offenbar $\varepsilon = \delta + 2\varrho$. Weil man nun aber bei den obigen Versuchen den einen Faden dem anderen so lange näherte, bis die Distanz beider Fadenbilder dem Durchmesser eines Fadenbildes gleich erschien, ist auch $2\varrho = \delta = \frac{1}{2}\varepsilon$. — Der Halbmesser r des Netzbautbildes eines Fadens findet sich ohne Rücksicht auf Irradiation mittelst der Proportion in §. 204. Es ist also $2\varrho > 2r$, und die Differenz $2\varrho - 2r$ giebt die durch Irradiation bewirkte Verbreiterung eines Fadenbildes, d. h. den Durchmesser eines Zerstreuungskreises.

Nun betrug der mittlere Werth einer hellen Distanz, die Volkmann in der Sehweite von 333^{mm} einem dunklen Faden von $0{,}0145^{mm}$ Breite für gleich erachtete, $0{,}207^{mm}$. Hiernach ist $2\varrho = 0{,}0055^{mm}$, $2r = 0{,}00199$ und $2\varrho - 2r$, d. h. die Grösse des Zerstreuungskreises, $= 0{,}0035^{mm}$.

Um zu erkennen, ob diese Rechnung und die Versuche Zutrauen verdienen, bemühte sich Volkmann, die Distanz zwischen den Fäden doppelt so gross als den Durchmesser der Fäden herzustellen, und fand im Mittel, 0,337. Gestützt auf die zuvor erwähnten Versuche, wonach $2\varrho = 0{,}0055^{mm}$ war, und mit Hilfe des Ausdruckes $\varepsilon = \delta + 2\varrho$, der für den jetzigen Fall, wo $\delta = 4\varrho$, in $\varepsilon = 4\varrho + 2\varrho = 6\varrho$ übergeht, liess sich die gesuchte Distanz, nämlich diejenige, welche doppelt so gross als der Durchmesser des Fadens erscheinen sollte, auch berechnen*), und es ergab sich hierfür $0{,}328^{mm}$, ein Werth, der von dem obigen durch Versuche gefundenen (0,337) nicht sehr beträchtlich abweicht.

Als mit den Fäden unter auffallendem Glanzlichte vor einem dunklen Hintergrunde operirt wurde, fand Volkmann für die Distanz, welche dem Durchmesser eines Drahtbildes gleich erschien, im Mittel von 24 Beobachtungen $0{,}304^{mm}$, woraus sich nach obiger Weise der Durchmesser des Zerstreuungskreises zu $0{,}0046^{mm}$

---

*) a. a. O. S. 144.

berechnet. Die nicht unerhebliche Differenz zwischen diesem Werthe und dem obigen = 0,0035^{mm}, der sich auf den Fall bezieht, wo die zwischen den Fäden liegende Distanz weiss erscheint, beruht, wie Volkmann bemerkt, unstreitig darauf, dass die Iradiation durch das Glanzlicht sehr begünstigt wurde.

In den bisherigen Versuchen hatten die Fäden eine vertikale Stellung. Als Volkmann die horizontal gelegten Fäden aus eben der Entfernung betrachtete, als zuvor die vertikal gerichteten, war das Bild derselben sehr undeutlich; es war der Gebrauch einer schwachen Convexbrille erforderlich, um die früher benutzte Sehweite von ungefähr 333^{mm} festzuhalten. Es ergab sich dann auf Grund von 10 Beobachtungen und mittelst der obigen Rechnung der Durchmesser des Irradiationskreises zu 0,0047^{mm}, während die Beobachtungen an den vertikal gestellten Fäden nach dem Obigen zu einem Durchmesser von 0,0035^{mm} führten.

B. Schärfe des Sehens.

220. Die Schärfe des Sehens charakterisirt man gewöhnlich durch die Fähigkeit, mit unbewaffnetem Auge sehr nahe gelegene Objectpunkte zu unterscheiden oder überhaupt sehr kleine Objecte wahrzunehmen. So bezieht sie sich bei der Wahrnehmung grösserer Objecte auf die scharfe Unterscheidung des feineren Details, das innerhalb des Umrisses eines solchen Objects vorhanden ist.

Gewiss hängt die Schärfe des Gesichts von der Vollkommenheit ab, womit das Auge seine dioptrischen Verrichtungen vollzieht; d. h. die möglichst scharfe Auffassung eines Objects erfordert ein möglichst vollständiges Netzhautbild desselben, in der Art, dass die Bilder sehr nahe gelegener Objectpunkte nicht mit Zerstreuungskreisen in einander greifen, wodurch die Unterscheidung dieser Punkte beeinträchtigt oder gar unmöglich gemacht wird, falls nämlich der Durchmesser der Zerstreuungskreise eine gewisse Grenze überschreitet.

Betrachten wir, der Wahrscheinlichkeit gemäss, die Stäbchen- und Zapfenschicht der Retina als das lichtpercipirende Organ (S. 222 ff.), so können zwei benachbarte Zapfen zu zwei gesonderten Empfindungen zweier nahegelegener Objectpunkte führen, wenn die von den letzteren kommenden Lichtstrahlen nicht zwei Bilder auf einem Zapfen liefern; vielmehr müssen die Strahlen des einen Punktes auf den einen und die des zweiten auf den anderen Zapfen mög-

lichst beschränkt bleiben, während es sonst gleichgiltig erscheint, ob die Vereinigung der Strahlen innerhalb eines Zapfens in einem Punkte oder in einem Kreise geschieht, sobald nur der letztere nicht in den Bereich des nächsten Zapfens merklich eingreift.

221. Die Zapfen- und Stäbchenschicht lässt sich als eine Reihe für das Licht durchdringlicher Prismen ansehen. Gesetzt nun, das Bild eines Objects liege in der vorderen Endfläche dieser Schicht, und es entspreche je einem Objectpunkte ein Bild auf je einem Zapfen. Wegen der Durchsichtigkeit der Zapfen könnte dann ein Strahl, der die Wand eines Zapfens (oder Stäbchens) trifft, in den nächsten Zapfen eindringen, was dann, ungeachtet der Sonderung der Bildpunkte auf der vorderen Fläche der Zapfenschicht, wieder zu einer das scharfe Sehen beeinträchtigenden Mischung der Empfindungen führen würde. Indessen hat Brücke*), noch bevor die Stäbchen- und Zapfenschicht als sog. lichtpercipirendes Organ aufgefasst wurde, darzuthun gesucht, dass die Zapfen und Stäbchen einen katoptrischen Apparat darstellen, der die Forderung einer genau beschränkten Lichteinwirkung realisire. Die Substanz der Zapfen und Stäbchen ist stärker brechend als das umgebende Medium, worin sie liegen. Sei nun in nebenstehender Figur, welche zwei Zapfen in vergrössertem Massstabe vorstellt, v der Vereinigungs- oder Kreuzungspunkt eines Strahlenbündels; dann werden die Randstrahlen die Wand des betreffenden Zapfens unter spitzen Winkeln treffen, und daher auch die Winkel, die sie mit dem Einfallslothe bilden, nur wenig von einem rechten verschieden sein. Für den Strahl l, der die Wand im Punkte e trifft, ist das Einfallsloth hh' und leh der Einfallswinkel. Wenn nun, wie hier, wo ein stärker brechendes Medium an ein schwächer brechendes grenzt, für einen gewissen Einfallswinkel der Sinus des Brechungswinkels die Einheit übersteigt, so wird der Brechungswinkel selbst imaginär (§. 14), d. h. der Strahl geht gar nicht in das schwächer brechende Mittel über, sondern erfährt bei e eine totale Reflexion. Daher bleiben die von einem Zapfen einmal aufgenommenen Strahlen innerhalb desselben, ohne in den benachbarten einzudringen,

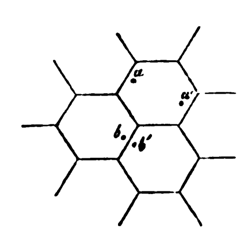
Fig. 148.

*) Müller's Archiv. 1844.

und die von einem Objectpunkte kommenden Strahlen können nur dann verschiedene Zapfen treffen, wenn das Bild zu weit vor oder hinter die Retina fällt, weil eben nur dann auf der vorderen Endfläche der Stäbchen- und Zapfenschicht Zerstreuungskreise entstehen, die über den Bereich eines Zapfens hinaus in den des nächsten fallen.

Hervorgehoben sei gleich hier die Möglichkeit, dass zwei Retinabilder, die zwei Objectpunkten entsprechen, wohl immerhin noch zu zwei gesonderten Empfindungen führen können, wenn auch ihr Abstand auf der Retina viel kleiner ist, als der Durchmesser eines Zapfens. Dies erhellt sofort aus Fig. 149, die im vergrösserten Massstabe mehrere im Querdurchschnitte als hexogonal gedachte Zapfen vorstellt*). So werden die beiden auf einem Zapfen gelegenen Bildpunkte *a*, *a'* zu einer Empfindung verschmelzen, obschon ihr Abstand viel grösser ist als die Entfernung der Bildpunkte *b*, *b'*, die, weil sie auf verschiedenen Zapfen liegen, auch zwei gesonderte Empfindungen gewähren mögen. Doch lässt sich dies, meines Erachtens, nicht sofort auf die kleinsten wahrnehmbaren Distanzen anwenden, wie etwa zweier heller Punkte auf dunklem Grunde, oder umgekehrt zweier dunkler Punkte, die durch einen hellen Zwischenraum von einander getrennt sind. Hier ist es, abgesehen von einer Bewegung des Auges, aller Wahrscheinlichkeit nach nothwendig, dass auf der Retina das Interstitium zwischen den Bildern der beiden Punkte, deren Distanz wahrzunehmen ist, auf mehrere oder doch mindestens auf einen Zapfen fällt, der von diesen Punkten nicht afficirt wird. — Wir werden hierauf späterhin noch einmal zurückkommen.

Fig. 149.



222. Führt der Erregungszustand eines jeden Zapfens, der mit einer Nervenfaser verbunden ist, zu einer besonderen Empfindung, so lässt sich vermuthen, dass das schärfste Unterscheidungsvermögen diejenige Netzhautpartie gestatten wird, auf welcher die Zapfen am dichtesten beisammen stehen. Diese Netzhautpartie kennen wir als den sog. gelben Fleck (§. 137), der die meisten Zapfen enthält, von denen jeder mit einer besonderen Nervenfaser

*) s. H. Müller in Verhandl. d. med. Ges. in Würzb. 1852. S. 338, u. A. Fick, med. Phys. S. 272.

in Verbindung steht, während die Zapfen auf den seitlichen Theilen der Retina seltner und umgeben von Stäbchen vorkommen, deren mehrere mit einer Nervenfaser verbunden sind. Alle solche Stäbchen aber, die zu einer Nervenfaser führen, vermitteln wahrscheinlich auch nur ein Empfindungselement. Am vollkommensten für die Gesichtsschärfe hat sich die Mitte des gelben Fleckes erwiesen, so dass Gegenstände, deren Bilder auf die Netzhautgrube (fovea centralis) fallen, am deutlichsten gesehen werden. Auch wird hier, da sich dieser Theil der Retina als eine Ebene betrachten lässt, das Bild eines ebenen Objects dem letzteren selbst Punkt für Punkt entsprechen.

Man nennt nun das Sehen mittelst des gelben Fleckes das directe, dagegen das durch die seitlichen Retinatheile vermittelte das indirecte Sehen. Dass dieses sehr viel undeutlicher als jenes ist, erfährt man schon, wenn man das Auge fest auf ein Object, z. B. den Buchstaben oder Punkt einer Zeile richtet; dann erscheint das fixirte Object, dessen Bild auf die Mitte des gelben Fleckes fällt, vollkommen deutlich, während wohl auch die allernächsten Buchstaben kenntlich, die weiter seitlich gelegenen aber gar nicht in ihrer Bestimmtheit zu erkennen sind, falls man nämlich das Auge möglichst unbewegt erhält. Um aber die Bewegung des Auges, die bei solchen Versuchen störend einwirken kann, auszuschliessen, benutzte E. H. Weber*) eine durch den elektrischen Funken einer Leydener Flasche momentan erleuchtete Schrift, die gleichwohl, wegen der Fortdauer des Lichteindruckes, noch erkennbar war. Nun lässt sich aber aus der Grösse der Fläche, auf der die Buchstaben noch erkannt werden, aus dem Abstande derselben vom Auge und aus dem Abstande des Kreuzungspunktes der Lichtstrahlen von der Retina der Durchmesser des empfindlichsten Theiles der Retina bestimmen; und es fand sich, dass derselbe bei E. H. Weber und seinem Bruder zwischen $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$ Linie betrug**), wobei die Lage des Kreuzungspunktes nahe vor dem Mittelpunkte des Auges angenommen wurde. —

Ferner ist die Schärfe des Sehens bedingt durch den Grad der Erregbarkeit oder Empfindlichkeit der Netzhautelemente. So

*) in R. Wagner's Handw. der Physiol., Bd. III. Abthl. 3. Art. Tastsinn. S. 532.

**) s. §. 137 dieser Abthl.

kann eine sehr mässige Lichteinwirkung wohl in einem Auge noch zu einer merklichen Empfindung führen, nicht aber in einem anderen, minder empfindlichen Auge, das dann feinere Unterschiede innerhalb des Umrisses eines Objects nicht so scharf als jenes und unter Umständen wohl auch gar nicht aufzufassen vermag, wenn auch sonst die Retinabilder in beiden Augen, optisch genommen, durchaus gleichwerthig sind.

223. Numerische Angaben über die Gesichtsschärfe hat man gewonnen durch Bestimmung der kleinsten wahrnehmbaren Grössen und Distanzen.

Der Gesichtswinkel wird bekanntlich bei einem und demselben Object um so kleiner, je weiter sich dasselbe von unserem Auge entfernt, und kann endlich so klein werden, dass sich das Object der Wahrnehmung entzieht. Natürlich ist hierbei der Gegensatz oder der Contrast zwischen der Farbe des Objects und Hintergrundes von Bedeutung, wie denn auch ein Object um so leichter erkennbar, je grösser die Lichtdifferenz zwischen ihm und dem Hintergrunde ist. Kennt man aber die absolute Grösse eines Objects und die grösste Entfernung, aus der es überhaupt noch sichtbar ist; so lässt sich leicht der kleinste Gesichtswinkel bestimmen (s. §. 204), unter dem es eben noch erkennbar, oder auch das kleinste Netzhautbild, das zur Wahrnehmung dieses Objects erforderlich ist. So liess Hueck*) von verschiedenen Personen mit normalen Augen Objecte von verschiedener Gestalt und Farbe, die zunächst innerhalb der deutlichen Sehweite aufgestellt wurden, dergestalt betrachten, dass sich der Beobachter von dem betreffenden Objecte immer weiter entfernte, bis dieses für das Gesicht verschwand. Alsdann wurde auf die bezeichnete Weise der kleinste Gesichtswinkel berechnet, unter welchem das Object eben noch sichtbar war oder eben verschwand. Es fand sich nun unter anderem, dass man eine Linie weiter sieht als einen Punkt von gleichem Durchmesser, weisse Objecte auf schwarzem Grunde weiter als schwarze Objecte auf weissem, und dass bei grösseren Entfernungen der zum Erkennen der Gegenstände erforderliche Gesichtswinkel allmälig etwas zunimmt. Der kleinste Gesichtswinkel, unter welchem weisse Punkte auf schwarzem Grunde sichtbar waren, betrug 2,6'', dagegen für weisse Linien auf demselben



Grunde 1,2″. Einen Spinnenfaden sah Hueck selbst noch unter einem Winkel von 0,6″ und einen glänzenden Draht unter 0,2″.

Darwin in seiner Reise um die Welt*) erzählt einen Fall, wo lange Objecte aus einer sehr grossen Entfernung noch sichtbar waren. Beim Besteigen des 6400 Fuss hohen Campana (Glockenberges) in Chili konnte er die Masten der Schiffe, die in Valparaiso in einer Entfernung von 26 geogr. Meilen vor Anker lagen, noch als dünne schwarze Streifen unterscheiden. Rechnet man den Durchmesser dieser Maste zu 1 Meter, so war der Gesichtswinkel bei der eben genannten Entfernung 2,1″ gross.

Beiläufig sei hier auch erwähnt, dass nach Mädler**) die Otaheitier den Uranus, der einen scheinbaren Durchmesser von 3,9″ hat, schon lange vor Herschel gekannt haben. Musschenbroek***) erzählt, dass die Jupitermonde, deren grösster einen scheinbaren Durchmesser von 1,5″ hat, von Manchen mit blossen Augen gesehen worden seien. Und in einem Briefe von Sir J. Herschel (Americ. Journ. of Sc. and Arts, 1855, March, p. 273) schreibt ein amerikanischer Missionär, D. T. Stoddard, der zu Orumich in Persien sich aufhält, dass er in diesem so günstigen Klima nicht allein die Jupitersmonde mit blossem Auge sehen, sondern selbst die Ringe des Saturn und die Lichtphasen der Venus erkennen könne, sowie auch einige Doppelsterne als solche zu unterscheiden vermöge †). —

Volkmann ††) erkannte ein 0,002″ dickes Haar auf eine Entfernung von 30″, wo das Netzhautbildchen einen Durchmesser von 0,000033″ hatte. Ein Schüler von Bär's vermochte aber $\frac{1}{60}$‴ dickes Haar in einer Entfernung von 28 Fuss noch wahrzunehmen; und in diesem Falle betrug der Durchmesser des Netzhautbildchens nur 0,0000021″.

Weil man eine Linie weiter sieht als einen Punkt von gleichem Durchmesser, so ist wohl zu erwarten, dass auch längere

---

*) Deutsch von Dieffenbach, Th. II. S. 6.

**) Populäre Astronomie. S. 273.

***) Introductio ad philos. nat. 2, p. 773; Humboldt's Kosmos, Bd. 3. S. 118.

†) Harting, das Mikroskop, deutsch von Theile, Braunschw. 1859. S. 67.

††) Art. Sehen in R. Wagner's Handw. der Physiol. Bd. 3, Abthl. 1. S. 331.

Linien weiter gesehen werden, als kürzere von gleicher Breite; was nach Versuchen von Bergmann*) wirklich der Fall ist.

Nach E. H. Weber's**) Versuchen kann man eine weisse Linie auf schwarzem Grunde aus einer mehr als dreimal so grossen Entfernung wahrnehmen als ein gleichseitiges Viereck von der Breite der Linie; und diese Entfernung kann bei heller Erleuchtung der Linie und einem sehr abstechendem Hintergrunde noch grösser werden.

Natürlich erfordert die deutliche Erkennung einer bestimmten Gestalt einen grösseren Gesichtswinkel als die blosse Wahrnehmung des Objects überhaupt. Nach Hueck's ***) Versuchen lässt sich ein Quadrat von 1,2‴ Durchmesser auf 11′ Entfernung, d. h. unter einem Sehwinkel von 2′ 35″ noch als Quadrat erkennen. Und nach Harting†) müssen viereckige Körper, um erkannt zu werden, etwa fünfmal grösser sein, als nöthig ist, wenn sie bloss gesehen werden sollen.

224. Mit Rücksicht auf Farbe und Beleuchtungsgrad stellte Plateau††) einige hierher gehörige Versuche an, indem er kleine farbige Papierscheiben von 1 Centimeter Breite auf einer im Freien vertikal aufgestellten schwarzen Tafel befestigte und sich allmälig so weit entfernte, bis die farbige Scheibe nur noch als eine kleine, kaum wahrnehmbare Wolke erschien, und einige Schritte weiter vollständig verschwand. Hierauf wurde die Entfernung vom betreffenden Object bestimmt und der Gesichtswinkel berechnet. Zwei Versuchsreihen führten zu folgenden Resultaten.

	Gesichtswinkel	
	im Schatten	im Sonnenschein.
Weiss	18″	12″
Gelb	19″	13″
Roth	31″	23″
Blau	42″	26″

*) Henle's u. Pfeuffer's Zeitsch. f. rat. Medic. III. F. Bd. II. S. 92.

**) Berichte der königl. Sächs. Ges. der Wissensch. Leipzig 1852. S. 142.

***) Müller's Archiv. 1840. S. 88.

†) Das Mikroskop, deutsch von Theile. S. 81.

††) Sur quelques propriétés des impressiones produites par la lumière, p. 25; — Poggend. Ann. Bd. XX. S. 327.

Hiernach kann also ein weisses Object, um noch gesehen zu werden, merklich kleiner als ein blaues sein (s. übrigens auch §. 194).

Versuche, die den Einfluss der Lichtdifferenz auf die Unterscheidung der Gesichtsobjecte betreffen, wurden von Twining*) angestellt. Eine weisse Tafel, auf der sich schwarze runde Flecke in regelmässiger Anordnung befanden, erhielten ihre Beleuchtung durch eine Lampe. Twining bestimmte nun die Entfernung der letzteren, bei welcher die schwarzen Flecke als gesondert zu erscheinen aufhörten, wenn das Auge in verschiedene Entfernung von denselben gebracht wurde. Die Versuche führten zu dem Ergebniss, dass, wenn die Abstände des Auges in geometrischer Progression abnehmen, die zugehörigen Lampendistanzen in arithmetischer Progression wachsen. Doch sieht Fechner hierin mehr einen empirischen Ausdruck, an dessen Allgemeingiltigkeit unter andern Versuchsumständen man noch zweifeln könne, als ein wirkliches Naturgesetz, hält indess diese Versuche insofern von Interesse, als daraus hervorgeht, dass die Beleuchtungsintensitäten, bei welchen das deutliche Erkennen der Flecke beginnt oder aufhört, sich in sehr starkem Verhältnisse vergrössern, wenn ein grosser Augenabstand in gegebenem Verhältnisse vergrössert wird, dagegen in geringem Verhältnisse, wenn ein kleiner Augenabstand in demselben Verhältnisse vergrössert wird. So entsprechen den beiden grössten Augenabständen 107,29 und 134,11 engl. Zoll, die Twining anwandte, und das Verhältniss 4 : 5 bilden, die Lampenabstände 29,5 und 15,5 engl. Zoll, d. h. ein Verhältniss der Beleuchtungsintensitäten wie 1 : 3,62, hingegen den beiden kleinsten Augenabständen, die derselbe benutzte, 28,12 und 35,16 Zoll, deren Verhältniss gleichfalls 4 : 5 ist, die Lampenabstände 131,6 und 110,5, d. h. ein Verhältniss der Beleuchtungsintensitäten wie 1 : 1,419**).

225. Die bisherigen Bestimmungen über die kleinsten wahr-

*) Enquiries concerning Stellar Occultations by the Moon and the Planets, — experiments upon Light and Magnitude in relation to Vision, in American J. of scienc. 1858. Juli. V. C. XXVI. [2]. p. 15. — Hier nach Fechner: Elemente der Psychophysik, Leipzig 1860. Th. I. S. 269 f.

**) s. Fechner a. a. O. S. 270.



nehmbaren Grössen*) und Distanzen, über welche letztere wir noch verschiedene numerische Angaben folgen lassen, sind sämmtlich ohne Rücksicht auf die Irradiation festgestellt, die doch, wie wir wissen, selbst bei wohl accommodirtem Auge ihren Einfluss geltend macht; daher denn auch die berechneten Grössen der entsprechenden Netzhautbilder mehr oder minder fehlerhaft sein müssen. Dessenungeachtet sind diese Angaben von Interesse, da sie immerhin ein gewisses Mass oder eine empirische Grenze für die Schärfe des Sehens darbieten.

Was nun die kleinsten wahrnehmbaren Distanzen betrifft, so benutzte man zu Versuchen hierüber Punkte und Linien oder Liniensysteme. Zwei sehr nahestehende helle Punkte oder Linien werden nicht mehr unterschieden werden können, wenn ihre Netzhautbilder mit Zerstreuungskreisen ineinandergreifen und die Mittelpunkte der letzteren gegen ihre Peripherie nicht eine überwiegende Helligkeit besitzen. Dunkle Punkte und Linien auf hellem Grunde werden durch Irradiation von Seiten des letzteren verblasst, auch scheinbar verbreitert, so dass ihre Bilder bei einer gewissen Nähe ebenfalls ineinander laufen und mit dem Grunde verschmelzen. So verschmelzen nach Hueck**) zwei schwarze Punkte, die auf weissem Grunde 0,45‴ voneinander abstehen, miteinander bei 10 Fuss Entfernung vom Beobachter, wo dann ihre Distanz unter einem Winkel von 1′4″ erscheint.

Volkmann***) konnte zwei Spinnengewebefäden, die in paralleler Richtung und in einer Distanz von 0,0052″ nebeneinander aufgespannt waren, auf 7″ Entfernung als doppelt erkennen, aber nicht weiter. Der scharfsichtigste unter seinen Freunden erkannte die Duplicität auf 13″ Entfernung. Aus diesen Werthen berechnete sich die Distanz der Netzhautbildchen für Volkmann's kurzsichtiges Auge zu 0,00037‴, für das scharfsichtige seines Freundes zu 0,00021″. Ferner erkannte Volkmann zwei schwarze Parallellinien auf weissem Grunde, die sich in einer gegenseitigen Distanz von 0,016″ befanden, mit Hilfe einer Brille in der Ent-

*) Angaben hierüber findet man noch bei Tobias Mayer: Comment. Soc. sc. Gotting. 1754, pg. 101. — Vgl. auch Ehrenberg in Poggend. Ann. Bd. XXIV. S. 35.

**) Müller's Archiv. 1840. S. 87.

***) Art. Sehen in Wagner's Handw. Bd. 3. Abth. 1. S. 331.

fernung von 27″. Und in diesem Falle war die Distanz der Netzhautbildchen = 0,00029″.

Valentin*) unterschied noch zwei Linien, deren Bilder auf der Netzhaut um 0,0009‴ von einander abstanden.

E. H. Weber**) liess Versuche von verschiedenen Personen mit schwarzen Linien anstellen, die durch Maschinenstich sehr eng und gleichmässig gezogen und auf weisses Papier gedruckt waren. Dieselben waren 0,025 Paris. Linien breit und durch eben so breite Zwischenräume von einander getrennt. Nun erkannte Weber's Sohn (Theodor) die Linien noch in einer Entfernung von 9 Par. Zoll 2¼ Lin., so dass in diesem Falle ein Zwischenraum unter dem Gesichtswinkel von 45,3 Sec. erschien, was auf der Retina einer Grösse von 0,00148 Par. Lin. entspricht. Eine andere Person, die scharfsichtigste, erkannte die Linien noch in 11 Zoll Abstand, woraus sich für den Gesichtswinkel des Zwischenraumes 36,5 Sec. oder für das entsprechende Retinabild des letzteren 0,00119 Par. Linien ergab.

226. Anderweitige Versuche mit gestreiften Figuren oder Liniensystemen liegen noch vor von T. Mayer***), Hueck†), Marie Davy††) und Bergmann†††).

Letzterer benutzte zu seinen Versuchen vorzugsweise lithographirte Gitterzeichnungen, deren Striche und Zwischenräume jeder 1 Millimeter breit waren. Um dieselben anwendbar zu machen, schnitt Bergmann ein rundes Loch von etwa 20^{mm} Durchmesser mitten in den Deckel eines runden Pappschächtelchens und legte die Gittertafel von Innen her gegen den Deckel fest, so dass nur ein kreisrunder Theil derselben durch jenes Loch aussen zum Vorschein kam, wodurch es möglich wurde, mittelst Drehung des Deckels den Gitterstäben jede beliebige Neigung zu geben, und derjenige, dessen Augen geprüft wurden, durch Angabe der Richtung den Beweis führen konnte, dass er sie wirklich sah.

---

*) Lehrbuch der Physiologie, Bd. II. S. 428.

**) Berichte d. königl. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. Leipz. 1852. S. 144.

***) Comment. soc. sc. Gotting. T. IV. p. 102.

†) Müller's Archiv, 1840. S. 87.

††) L'Institut. XVII. p. 59.

†††) Zeitsch. für rat. Medicin von Henle und Pfeuffer, III. Reihe. I. Bd. S. 88, 94 ff.

Aus einer grossen Anzahl von Versuchen ergab sich nun, dass die ausgewählt guten Augen mehrerer Individuen die Streifen mit ihren millimeterbreiten Zwischenräumen in 5,5 Meter Entfernung stets erkannten. Nachdem diese Entfernung herausgefunden, bemerkt Bergmann, war es leichter, die Anzahl der Versuche zu vervielfältigen, da es nicht mehr nöthig war, erst mehrere Proben in grösseren Entfernungen anzustellen und die Organe dabei fruchtlos anzustrengen. Daher liess er die Individuen den Massstab häufig erst bei 6 oder 6,5 Meter betreten und von da aus vorrücken. Häufig wurde jedoch auch schon in diesen grösseren Entfernungen, und sogar mitunter schon bei 7 Meter Abstand die Richtung der Striche wiederholt richtig erkannt. Auch machten die Experimentirenden öfter die Bemerkung, dass, wenn sie die Richtung der Striche wüssten, sie dieselben in diesen grössern Entfernungen sähen. Und bei einem früheren Versuche, schreibt Bergmann, begegnete es sogar, dass ein 10jähriger Knabe, auf dessen ausgezeichnetes Auge er gelegentlich aufmerksam geworden war, ihm 3mal hintereinander die jedesmal abgeänderte Richtung der Striche in einer Entfernung von 8 Metern richtig angab, dann folgte aber eine falsche Angabe.

Die Breite der Netzhautbilder für jeden Zwischenraum betrug nun, den Abstand des hinteren Knotenpunktes im Auge zu 15^{mm} gesetzt, nach Bergmann's Mittheilungen für:

5,5 Meter Distanz $= 0{,}00273^{m} = \frac{1}{366}^{mm} = \frac{1}{828}'''$
6 „ „ $= 0{,}0025^{m} = \frac{1}{400}^{mm} = \frac{1}{900}'''$
6,5 „ „ $= 0{,}0023^{m} = \frac{1}{433}^{mm} = \frac{1}{974}'''$
7 „ „ $= 0{,}00215^{m} = \frac{1}{466}^{mm} = \frac{1}{1048}'''$
8 „ „ $= 0{,}0018^{m} = \frac{1}{333}^{mm} = \frac{1}{2100}'''$

Bei der geringsten der hier angeführten Entfernungen beträgt die Grösse des Bildes der ganzen kleinen Gitterzeichnung nur erst $\frac{1}{18}$ bis $\frac{1}{16}^{mm}$ oder 0,0241''', und ist daher immer noch weit kleiner als der Boden der fovea centralis (s. §. 137). Indessen stellen sich diese Zahlen ein wenig grösser heraus, wenn man für die Entfernung des Knotenpunktes oder des Kreuzungspunktes der Richtungslinien von der Retina den Werth $15{,}1774^{mm} = 6{,}735'''$ in die Rechnung einführt.

Bergmann hebt hervor, dass in der Entfernung von $5{,}5^{m}$, in welcher recht gute Augen regelmässig mit Sicherheit die Richtung der Linien erkennen, die Bilder derselben etwas breiter als die

Hälfte des Zapfendurchmessers seien (s. §. 134), worin man immer schon eine wesentliche Beziehung zwischen diesen Dimensionen vermuthen könne.

227. Im Hinblick auf das Erkennen der gitterförmigen Zeichnung unter der Voraussetzung, dass die Zapfen gewissermassen Scheinheiten darstellen, bemerkt Bergmann: es werde sich dasselbe begreifen lassen, sobald Weiss und Schwarz auf den betroffenen Zapfen so vertheilt seien, dass dieselben streifenweise mehr Schwarz, streifenweise mehr Weiss erhielten, und sobald diese Streifen der Netzhaut denen der Zeichnung parallel liefen. Auch dürften die Beleuchtungsdifferenzen zwischen den Streifen nicht allzugeringfügig sein.

Bergmann weist hierbei noch auf die bestimmte Wahrnehmung hin, die man jedesmal macht, wenn man sich einer Gitterzeichnung von der Distanz an, in welcher man sie zuerst erkannte, allmälig nähert. Unverkennbar nimmt dann das Weiss an Reinheit und das Schwarz an Tiefe zu. Dies sei in so hohem Grade der Fall, dass man sich der Ueberzeugung nicht erwehren könne, es sei vorher auf allen Zapfen, welche die Empfindung des Hellen mit sich führten, dem Weiss noch viel Schwarz beigefügt gewesen, und umgekehrt.

Von Bedeutung sind hier noch die häufigen irrigen Angaben über die Richtung der Striche. Nicht selten fand sich in denselben über 5,5 Meter hinausliegenden Entfernungen, in welchen oft schon ein richtiges Erkennen eintrat, zwischendurch auch ein Irrthum. Der Experimentirende glaubte die Striche zu sehen, gab aber ihre Richtung falsch an. Und häufig kam die Täuschung vor, dass die Richtung der Striche gerade senkrecht zu der wirklichen angegeben wurde, obwohl, wie weitere Versuche lehrten, auch andere derartige Täuschungen zu Tage traten. Auch erschien die Gittertafel häufig in denselben Entfernungen scheckig. Ein Mann, der das Object gar nicht kannte, hielt es in einer Entfernung von 6 Meter für gewürfelt. — Allein die irrigen Wahrnehmungen von Streifen konnten, ebenso wie die richtigen in den grössten Entfernungen, nur kurze Zeit festgehalten werden. Einer der Experimentirenden machte schon nach den ersten Proben die Bemerkung, dass es öfter erst nach einiger Anstrengung gelinge, die Striche zu sehen und dass sie dann wieder verschwänden. Ihr Verschwinden kann, wie Bergmann bemerkt, offenbar nur auf Abstumpfung



des Auges oder darauf beruhen, dass das Gitterbild von einer Zapfengruppe, welche durch ihre Disposition entweder die irrige oder richtige Wahrnehmung begünstigte, auf eine andere geräth, die dies nicht thut; wobei nicht zu vergessen, dass das ganze Gitterbild den Boden der fovea centralis bei weitem nicht ausfüllt.

228. Um nun eine bestimmte Ansicht von den zuvor angedeuteten Wahrnehmungen zu gewinnen, legt Bergmann*) eine besondere Annahme über die Anordnung der Zapfen zum Grunde. Er stellt sich nämlich vor, dass die Zapfen (in kleineren Gruppen betrachtet) so nebeneinander geordnet sind, wie regelmässige gleichseitige, untereinander gleich grosse Sechsecke auf ebener Fläche zu gänzlicher Erfüllung des Raumes geordnet sein müssen; ähnlich wie die Zellen des Bienenstockes sich im Querschnitte zeigen. Diese Vorstellung ist insofern erlaubt, als die Zapfen im Allgemeinen im Querschnitte hexagonal erscheinen, auch einander benachbarte Zapfen im Allgemeinen keine merklichen Grössenunterschiede darbieten, und endlich die Krümmung der Netzhäute im Verhältniss zu den sehr kleinen Zapfen als unbeträchtlich erscheint.

Nun bilden die auf die bezeichnete Weise in einer Ebene geordneten Sechsecke in drei Richtungen, die sich unter Winkeln von 60° schneiden, Reihen miteinander, innerhalb deren jedes Sechseck einen grössten Durchmesser da hat, wo in den anstossenden Parallelreihen je zwei Sechsecke sich berühren und am schmalsten sind. — Auf eine mit solchen Sechsecken gebildete Tafel denkt sich Bergmann ein Gitter gelegt, dessen Stäbe irgend eine der drei Reihen unter rechten Winkeln kreuzen; wo sich dann die Frage erhebt, wie die Vertheilung der Bilder der Gitterstäbe auf den Sechsecken sein werde, z. B. unter der Voraussetzung, dass jeder Gitterstab die halbe Breite eines Sechseckes bedecke und die Distanzen der Stäbe eben dieselbe Breite haben.

Legt man unter diesen Voraussetzungen das Gitter so auf die Sechsecke, dass jedes derselben zur einen Hälfte einem Stabe, zur anderen einem Zwischenraume entspricht, und setzt man ein so auf den Zapfen entworfenes Netzhautbild weisser und schwarzer Striche; so erhält man als Resultat eine völlig homogene Mengung, eine ungefleckte graue Fläche. Verschiebt man dagegen das Gitter

*) a. a. O. S. 100 f.



auf den Sechsecken um ein Viertel der Breite der Sechsecke, so wird das Resultat ein anderes. Die Sechsecke sind nun je in einer Reihe von den Stäben, in der anderen von den Zwischenräumen mehr bedeckt, und zwar im Verhältnisse von 7 zu 5, so dass eine Reihe der Zapfen eine gleichmässige Mengung von 7 Theilen Schwarz und 5 Theilen Weiss erhalten, die nächste 7 Theile Weiss und 5 Theile Schwarz, eine dritte sich wie die erste, die vierte sich wie die zweite verhalten würde. Diese Reihen liegen aber rechtwinklig gegen die Bilder der Striche, und hierin scheint, wie Bergmann sagt, eine plausible Erklärung gegeben zu sein, wie jene Täuschungen: die Richtung der Striche gerade rechtwinklig gegen die wirkliche wahrzunehmen, entstehen könne. Auch liegt darin, dass solche Wahrnehmungen sehr flüchtig sein müssen, da eine Bewegung der Netzhautfläche um ein Viertel eines Zapfendurchmessers genügt, die Erscheinung wechselnd hellgrauer und dunkelgrauer Striche aus rein grauem Felde hervortreten und wieder in dasselbe verschwinden zu lassen; wie denn auch ferner leicht einzusehen, dass eine solche Erscheinung nicht nothwendig an eine ganz bestimmte Entfernung gebunden ist. Die Entfernung, — oder das Verhältniss der Breite der Striche zur Breite der Sechsecke, — kann sich etwas ändern, und noch immer können hellgraue und dunkelgraue Striche gesehen werden, rechtwinklig gegen die Richtung der objectiv vorhandenen gelegen. Nur würde man, fügt Bergmann hinzu, wenn ein solches Bild überhaupt scharf genug erschiene, um so analysirt werden zu können, jeden Strich allmälig seiner Länge nach aus der einen in die andere Nüance übergehen sehen, und jedesmal, wo ein Strich seine lichteste Stelle hätte, würden die benachbarten am dunkelsten sein, und umgekehrt. Bergmann erläutert diesen Fall durch ein in Zahlen ausgeführtes Beispiel, wobei sich noch ergab, dass die Bedingungen zum Auftreten der Erscheinung eines Gitters, welches rechtwinklig gegen das objectiv vorhandene steht, günstiger sind, wenn die Bilder der Stäbe und Zwischenräume etwas mehr als $\frac{1}{2}$ der Breite der Zapfen betragen, als wenn ihre Breite gerade $\frac{1}{2}$ entspricht, obschon ähnliche Erscheinungen auch dann eintreten können, wenn die Bilder im Querdurchmesser weniger als $\frac{1}{3}$ der Zapfenbreite haben.

Bergmann denkt sich nun, „dass die Anordnung und Gestalt der Zapfen sich streckenweise hinreichend der hypothetisch zu Grunde gelegten gleichen Sechsecke in einer ebenen Fläche an-



nähert, um die beschriebenen Erscheinungen auf die angegebene Weise zu ermöglichen, dass aber durch die kleinen Schwankungen der Augenaxe das Bild leicht auch auf andere Gruppen von Zapfen geführt werden kann, deren Stellung jene Illusion nicht begünstigt, es vielmehr möglich macht, dass kürzere oder längere Reihen in der Richtung, welche der wirklichen der Stäbe und Zwischenräume entspricht, mehr Schwarz und mehr Weiss erhalten."

229. Endlich sei noch auf ein Resultat hingewiesen, das Bergmann auf Veranlassung von H. Karsten fand. Dieser wurde nämlich zu der Ansicht geführt, dass das Erkennen der Gitter bei gewissen Richtungen der Stäbe leichter sein würde als bei anderen. Demzufolge stellte man Versuche mit einem Auge an, wo sich dann bald bei dem Prosector Gronau ergab, dass er die Linien, wenn sie von rechts oben nach links unten liefen, mit dem linken, bei entgegengesetzter Richtung mit dem rechten Auge in etwas grösserer Entfernung erkannte. In einer Entfernung von 6 Metern erkannte derselbe die zweite Lage unter günstigen Umständen jedesmal mit dem rechten, nie mit dem linken, die erste Lage mehrfach mit dem linken, nie mit dem rechten Auge.

Hiernach glaubt Bergmann annehmen zu dürfen, dass die Dimensionen der Zapfen so angeordnet sind, dass sie in einer Richtung gedrängter erscheinen, als in der anderen. Wenn z. B. das linke Auge die Linien von rechts oben nach links unten besser erkennt, so liesse sich dies dadurch erklären, dass die Zapfenquerschnitte in der Richtung rechtwinklig gegen die Bilder der Linien etwas geringere Durchmesser darböten, als parallel denselben. Doch gesteht Bergmann, dass nicht alle seine hierher gehörigen Resultate zu einer solchen Erklärung auffordern. Er selbst sehe z. B. sowohl horizontale als vertikale Gitter leichter, als schrägliegende mit beiden Augen zusammen, und hat in Beziehung auf die schrägliegenden einen Unterschied seiner beiden Augen bei Einzelgebrauch derselben nicht bemerkt, was freilich, wie er noch hinzufügt, dadurch erschwert wird, dass sein linkes Auge bei diesen Versuchen sich überhaupt nicht so tüchtig zeigt, als das rechte.

Das leichtere Erkennen der Gitter nach gewissen Richtungen könnte wohl, wie es mir scheint, auch zum Theil auf optischen Gründen beruhen, und zwar auf der Abweichung des Auges von

der Kugelgestalt, oder, mit anderen Worten, auf der ungleichen Krümmung seiner brechenden Flächen in verschiedenen Schnitten (s. §. 197 ff.).

230. Dass die Gesichtsschärfe auf den Seitentheilen der Retina viel geringer als auf ihrem mittleren Theile ist, haben wir bereits (§. 222) hervorgehoben. Beobachtungen hierüber stellte Volkmann *) mit seinem Assistenten Hüttenheim in der Weise an, dass sie versuchten, wie weit ein Object zur Seite der optischen Axe vom Auge entfernt werden durfte, ehe es für die Wahrnehmung ganz verloren ging. Dieselben benutzten als Objecte runde schwarze Punkte auf weissem Papier, markirten bei indirectem Sehen das Maximum der Entfernung, in welcher diese Punkte sichtbar waren, und berechneten für jeden Fall die Grösse des Netzhautbildchens. Nach diesen Beobachtungen nimmt die Schärfe des Sehens von der optischen Axe nach der Seite hin stetig ab, allein merkwürdiger Weise im ersten Grade in schnellster Progression. Und ferner ergab sich, dass die Stumpfheit des Gesichts in den Seitentheilen der Retina rascher zunimmt, wenn es sich um Distinction von Distanzen handelt, als wenn es nur darauf ankommt, einen einfachen Lichteindruck wahrzunehmen.

Auch von Hueck **) wurden über diesen Gegenstand Beobachtungen angestellt, die umfassendsten aber neuerdings von Aubert und Förster, die zunächst untersuchten ***), wie weit seitlich von der Sehaxe Objecte von bestimmter Grösse erkannt werden können. Weil es hierbei nöthig war, die Netzhaut auf eine bestimmte Zeit unverrückt zu erhalten, ein absolutes Ruhighalten des Auges aber sehr schwer ist, wenn man die Absicht hat, einen Gegenstand, der relativ weit von der Sehaxe entfernt liegt, zu erkennen; so benutzten dieselben nach dem Vorgange Volkmann's und Weber's die Beleuchtung des zu erkennenden Objects durch den elektrischen Funken, dessen Dauer so kurz ist, dass während derselben eine Augenbewegung nicht wohl ausgeführt werden kann; daher das, was man während dieser Zeit sieht, mittelst der ruhenden, unbewegten Retina gesehen wird.

Als Objecte liessen die Genannten auf einem 2 Fuss breiten



*) Art. Sehen in Wagner's Handw. der Physiol. Bd. III. Abth. 3. S. 332 f.
**) Müller's Archiv. 1840. S. 82.
***) Gräfe's Archiv für Ophthalmologie, Bd. III. Abth. II. S. 1.

und 5 Fuss langen Bogen Papier Zahlen und Buchstaben von gleicher Grösse in gleichen Zwischenräumen drucken. Dieser Bogen konnte über zwei horizontal liegende Walzen, die in vertikaler Richtung voneinander entfernt waren, gerollt werden, so dass durch das Drehen der Walzen immer neue Zahlen oder Buchstaben in das Gesichtsfeld gebracht wurden. Ferner befand sich in immer gleicher Entfernung und Richtung zu dem bedruckten Bogen eine Leydener (Riess'sche) Flasche mit unveränderter Entfernung ihrer beiden Kugeln dem Bogen gegenüber, nach welchem letzteren durch eine entsprechend weite und kurze Röhre von geschwärztem Papier gesehen wurde. Auf solche Weise war dem Auge ein bestimmter Ort angewiesen, der in allen Versuchen derselbe blieb, und zugleich blendete die Röhre das von dem überspringenden Funken direct zum Auge strahlende Licht ab.

Der Bogen mit den Zahlen konnte dem Auge des Beobachters genähert und von ihm entfernt werden, wodurch sich eine grosse Anzahl verschiedener Gesichtswinkel für dasselbe Object hervorbringen liess. Und durch Drehen über die Walzen konnten stets neue, dem Beobachter jedesmal unbekannte Ziffern und Buchstaben in das Gesichtsfeld gebracht werden.

Die Versuche geschahen in einem verfinsterten Zimmer, das so dunkel war, dass nach einigem Aufenthalte darin die Zahlen des Bogens noch als matte Punkte zu erkennen waren. Finsterer durfte das Zimmer nicht sein, weil es durchaus nöthig war, das Auge für die entsprechende Entfernung des Bogens zu accommodiren.

Aubert und Förster erstreckten nun ihre Versuche auf vier Bogen mit Ziffern von verschiedener Grösse und Entfernung voneinander in zehn Entfernungen zwischen 0,1 und 1 Meter vom Auge, und machten für jede dieser Entfernungen 10 — 20 Einzelbeobachtungen, also im Ganzen 500 Einzelbeobachtungen. Gegeben waren nun die jedesmalige Entfernung des Bogens von dem Auge, ferner der Durchmesser der Zahlen oder Buchstaben, und ebenso die Entfernung derselben voneinander. Die Menge der Zahlen, die man aufnotirt hatte, sowie ihre gleichfalls bezeichnete Lage zueinander liess dann den Raum finden, auf welchem man die Zahlen zu erkennen im Stande gewesen war. Bei der Berechnung der diesem Raume entsprechenden Gesichtswinkel benutzten die Genannten immer den grössten Durchmesser desselben. Die Hälfte

des Durchmessers bildete dann die eine Kathete, die Entfernung des Bogens vom Auge die andere Kathete eines rechtwinkligen Dreiecks, durch deren Division sich die Tangente oder Cotangente des gesuchten Winkels ergab. Dieser Winkel, mit 2 multiplicirt, ist der Gesichtswinkel des Raumes, in dem Aubert und Förster die Ziffern erkennen konnten, und wird von ihnen kurzweg „Raumwinkel" genannt. Ebenso berechneten dieselben den Gesichtswinkel für den grössten Durchmesser der Zahlen, und führten ihn in den Tabellen*), welche die Versuchsresultate gaben, als „Zahlenwinkel" auf.

231. Die Schlüsse, welche Aubert und Förster aus diesen Beobachtungen zogen, sind nun folgende:

1) Je weiter eine Zahl von der Augenaxe entfernt ist, um so grösser muss sie sein, wenn sie deutlich erkannt werden soll.

2) Bei der Bestimmung des Verhältnisses, in welchem die Grösse der Zahlen zu dem Raume, auf dem sie erkannt werden, zu- oder abnimmt, zeigt sich ein eigenthümlicher Widerspruch in den Beobachtungen. Bei Vergleichung nämlich der Zahlen- und Raumwinkel desselben Bogens zeigt sich fast für jede Entfernung das gleiche Verhältniss zwischen beiden, so dass keine progressive, sondern eine proportionale Abnahme des Zahlen- und Raumwinkels stattfindet. Erst von der Zone des blinden Fleckes an wird die Abnahme des Raumwinkels im Verhältniss zu der des Zahlenwinkels progressiv. Dagegen zeigt sich, wenn man bei gleichen Entfernungen das Verhältniss der Zahlen- und Raumwinkel vergleicht, eine sehr starke progressive Abnahme der Raumwinkel.

„Bei gleichem Zahlenwinkel (verschieden grosse Zahlen in verschiedener Entfernung betrachtet) werden kleinere Zahlen, die sich in geringer Entfernung vom Auge befinden, weiter von der Augenaxe entfernt erkannt, als grössere Zahlen in grösserer Entfernung; oder: bei gleichem Zahlenwinkel ist der Raumwinkel für grosse entfernte Zahlen kleiner, als für kleine nahe Zahlen"; — ein Satz, der nach der Bemerkung der Genannten an die Beobachtung von Liebreich**) erinnert, dem bei Accommodation für

*) a. a. O. S. 7—9, 11.
**) Gräfe's Archiv für Ophthalmologie, Bd. II. Abth. II. S. 266.

die Ferne die Grenzen des Gesichtsfeldes enger waren, als bei Accommodation für die Nähe.

3) Die Fähigkeit des Wahrnehmens der Formen nimmt nicht in concentrischen Kreisen um die Augenaxe ab, sie nimmt schneller nach oben und unten, langsamer nach aussen und innen ab; oder: die Netzhautstelle, mit der man Formen von einer bestimmten Grösse noch deutlich erkennt, ist nicht ein Kreis, sondern eine Curve, die sich einer Ellipse mit horizontal liegender grösster Axe nähert. So wurden 3, 4 und 5 Zahlen nebeneinander in horizontaler Richtung erkannt, sehr selten aber 3 Zahlen untereinander.

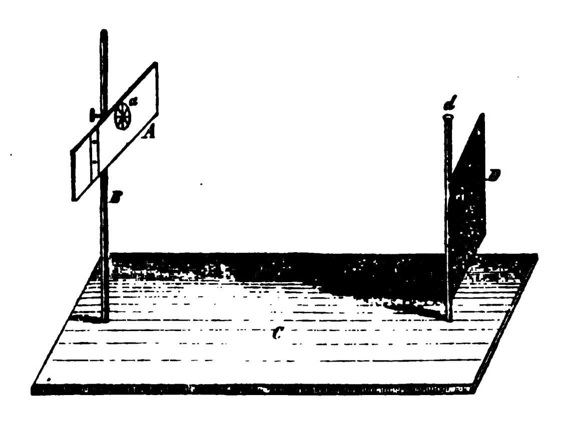
232. Hiernach wurde von Aubert und Förster noch eine Versuchsreihe*) bei continuirlicher Beleuchtung (mit einer Lampe) angestellt, indem sie von der Ansicht ausgingen, dass die Resultate des Erkennens von Zahlen und Buchstaben bei elektrischem Lichte nicht ohne weiteres auf das Sehen bei gewöhnlichem Lichte übertragen werden könnten, insofern das Auge aus tiefer Dunkelheit plötzlich in eine grosse Helligkeit versetzt sich nicht schnell genug adaptiren könne, und auch Aufmerksamkeit, Urtheil und Gedächtniss sich erst an diese Art von Sinneseindruck gewöhnen müssten. Bei dieser zweiten Versuchsreihe kam es vorzugsweise auf Beantwortung der Frage an, in welcher Distanz vom Centrum der Retina in verschiedenen Meridianen der letzteren zwei Punkte von gewisser Grösse, die sich in einer gegebenen Entfernung von einander befinden, noch als zwei distincte Punkte erkannt und unterschieden werden können.

Die zu diesen Versuchen benutzte Vorrichtung bestand (Fig. 150) aus einem weisslackirten Blechstreifen *A* von 0,3 Meter Länge und 0,05 M. Breite, welcher nach Art zweier Flügel einer Windmühle um eine Axe *a* gedreht werden konnte, und sich mit der letzteren an einer vertikalen Stahlstange *B*, die auf einem Brettchen *C* befestigt war, auf- und abschieben liess. An dem anderen Ende des Brettchens, der Axe des Blechstreifens gegenüber, befand sich das Auge des Beobachters, während sein anderes Auge durch einen schwarzen Papierschirm *D* verdeckt war, welcher an einem Holzstabe nach rechts und links gedreht werden konnte. Die Axe des

*) a. a. O. S. 12 ff.

Blechstreifens war 0,2 Meter vom Mittelpunkte der Grundlinie beider Augen des Beobachters entfernt.

Fig. 150.



Der Letztere legte nun bei den Versuchen die Nase an den Holzstab *d*, verdeckte mit dem Schirme das eine Auge und stellte die Axe der Blechtafel in gleiche Höhe mit den Augen. Hierauf fixirte er den Mittelpunkt der Tafel (oder die Spitze ihrer Axe) unverwandt und schob allmälig von der Seite her in den Falzen der Blechtafel eine weisse Karte mit 2 Punkten nach dem fixirten Punkte hin. Sobald nun der Beobachter, bei ununterbrochen fester Fixation der Mitte der Tafel, mit den seitlichen Theilen der Retina die zwei Punkte unterschied, hielt er die Karte fest, und las die Entfernung der beiden Punkte von dem Fixationspunkte an einer Metereintheilung, welche sich an den Falzen der Blechtafel befand, ab. Diese Entfernung wurde notirt, die Blechtafel dann um 45° gedreht und die Karte wieder von der Seite her nach dem fixirten Punkte geschoben, u. s. f. Auf solche Weise war nach einer ganzen Umdrehung der Tafel für acht Radien oder Rectinalmeridiane bestimmt, in welcher Entfernung von dem fixirten Punkte die zwei Punkte der Karte unterschieden werden konnten. — Beiläufig noch die Bemerkung, dass die Punkte auf möglichst weissem Papier mit schwärzester Tusche und möglichst rund gemacht waren. Dieselben wurden von vierfach verschiedener Grösse gewählt, dergestalt, dass stets zwei gleich grosse auf derselben Karte sich befanden, und je zwei Paar von correspondirender Grösse ungleich weit voneinander entfernt gemalt wurden. Die

zunächst gewonnenen Versuchsresultate sind in besonderen Tabellen zusammengestellt *).

Die Sätze aber, die sich aus den eben besprochenen Beobachtungen ergaben **), sind nachstehende: 1) Zwei nebeneinander liegende Punkte werden durch indirectes Sehen in desto grösserer Entfernung seitlich von der Augenaxe noch als distincte Punkte erkannt, je weiter sie voneinander entfernt sind. 2) Die Abnahme der Fähigkeit, die beiden Punkte distinct wahrzunehmen, ist in den verschiedenen Meridianen von der Augenaxe nach der Peripherie sehr ungleich. 3) Die Fähigkeit, zwei Punkte zu unterscheiden, nimmt in der Nähe der Augenaxe langsamer, je weiter von ihr um so schneller ab. 4) Die vier geprüften Augen (von Aubert und Förster) verhalten sich ungleich, zeigen aber jedes für sich eine Gleichmässigkeit in den einzelnen Beobachtungsreihen. 5) Wenn die beiden Punkte aufhören, als zwei unterschieden zu werden, so sieht man sie nicht als einen Punkt, sondern ganz eigenthümlich unbestimmt als etwas Schwarzes, dessen Form nicht weiter anzugeben ist.

233. Ausserdem überzeugten sich Aubert und Förster noch, dass die Unmöglichkeit, zwei Punkte in einiger Entfernung von der Augenaxe zu unterscheiden, ganz und gar nicht von physikalisch-optischen Verhältnissen abhängt, sondern höchst wahrscheinlich nur auf der Anordnung der Elementartheile der Retina beruht. Wären Zerstreuungskreise die Ursache dieser Unmöglichkeit, so hätten die Objectpunkte an scheinbarer Grösse zu-, an Intensität der Schwärze abnehmen müssen, so wie sie sich von der Sehaxe entfernten. Dieser Annahme entspricht jedoch das Aussehen zweier mit den Seitentheilen der Retina gesehenen Punkte nie. Das Erscheinende ist vollkommen schwarz, durchaus nicht verwaschen, aber gleichwohl ist seine Form nicht bestimmbar. Dagegen sahen Aubert und Förster, als sie in ihrer ersten Versuchsreihe die Bogen bis auf 0,15 M. oder gar 0,1 M. dem Auge genähert hatten, die Zahlen (ohne Brille) mit grossen Zerstreuungskreisen und grauem Rande, konnten sie aber dennoch erkennen.

Aubert und Förster untersuchten ***) in dieser Beziehung noch

*) a. a. O. S. 20—26.
**) a. a. O. S. 27 ff.
***) a. a. O. S. 33 f.

die Bilder zweier leuchtender Punkte auf der Retina eines ausgeschnittenen Kaninchenauges. Diese Punkte waren zwei Löcher in einem schwarzen Schirme, durch welche das helle Tageslicht hindurchfiel. Befand sich das Auge 0,2 Meter vom Schirme und liess man durch Drehen des Bulbus das Bild der beiden Löcher auf die verschiedensten Theile der hinteren halben Kugeloberfläche des Bulbus fallen, so war es hier überall so scharf, dass man noch mit blossem Auge die zwei Punkte bestimmt sehen konnte. Als man den Augapfel um 0,7 Meter von den zwei Löchern im Schirme entfernte, war mit blossem Auge und Loupe nichts mehr von den zwei Punkten zu erkennen, wohl aber mittelst eines Mikroskopes, das etwa 30 mal vergrösserte. Die Bilder der beiden Löcher erschienen im Kaninchenauge in viel grösserer Entfernung von der Sehaxe noch deutlich und distinct, als der Abstand der Grenze betrug, die in den beschriebenen Versuchen in Betracht kam.

Auch E. H. Weber*) gelangte zu der Ansicht, dass die schnelle Abnahme des Unterscheidungsvermögens in den seitlichen Theilen der Retina nicht auf den physikalisch-optischen Verhältnissen des Auges beruht.

In Bezug auf den sog. Raumsinn der Retina stellen nun Aubert und Förster als Resultate ihrer beiden Versuchsreihen nachfolgende Sätze hin. 1) Die Feinheit des Raumsinnes der Retina nimmt vom Centrum der letzteren nach ihren seitlichen Theilen hin ab. 2) Der Raumsinn der Retina wird nach den Seiten hin in steigender Progression stumpfer. 3) Die Abnahme der Feinheit des Raumsinnes ist in verschiedenen Richtungen der Retinalmeridiane verschieden, und zwar schneller nach oben und unten, langsamer nach aussen und innen. 4) Der blinde Fleck ist nicht als zwischen diese empfindenden Elemente eingeschoben, sondern als wirklicher Defect anzusehen**). 5) Die Abnahme der Feinheit des Raumsinnes verhält sich in verschiedenen Augen verschieden, auch bei demselben Individuum. Er steht mit Fern- und Kurzsichtigkeit in keiner Beziehung. 6) Der Raumsinn der Netzhaut verhält sich dem Raumsinn der Haut analog.

*) Berichte der Sächs. Ges. d. Wissensch. in Leipzig, 1852. S. 134.

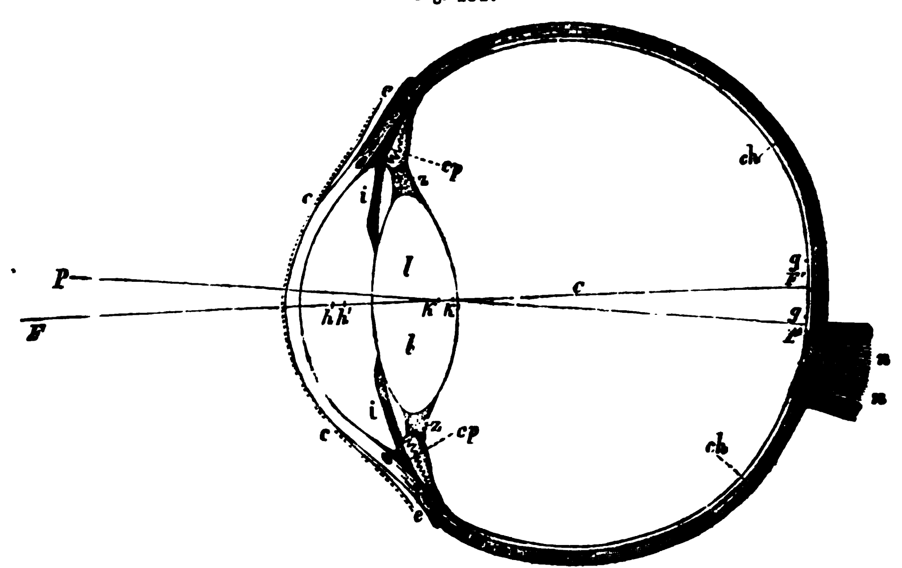
**) Vergl. hierzu a. a. O. S. 31.



C. Örtliche Beziehungen zwischen den Retinabildern und Gesichtsobjecten.

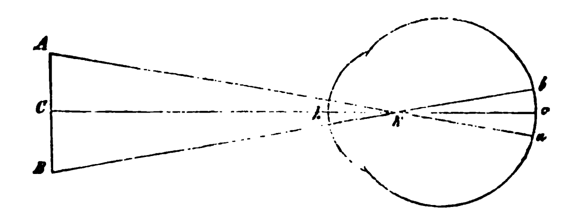
234. Man denke sich vom Netzhautpunkte *p* die hintere Richtungslinie *k'p* und zu dieser parallel auch die vordere Richtungslinie *kP* gezogen. Dann ist *p* der Ort der Retinabilder aller

Fig. 151.



in *kP* gelegenen leuchtenden Punkte, deren Strahlensysteme in *p* vereinigt werden, und die Richtungslinie *kP* enthält in unserem Sehfelde auch den scheinbaren Ort irgend eines Punktes, dessen Retinabild auf *p* fällt. Doch kann man die beiden Knotenpunkte *k*, *k'*, weil sie sehr nahe bei einander liegen und daher auch die beiden Richtungslinien *kP* und *k'p* nur wenig von einander abweichen

Fig. 152.



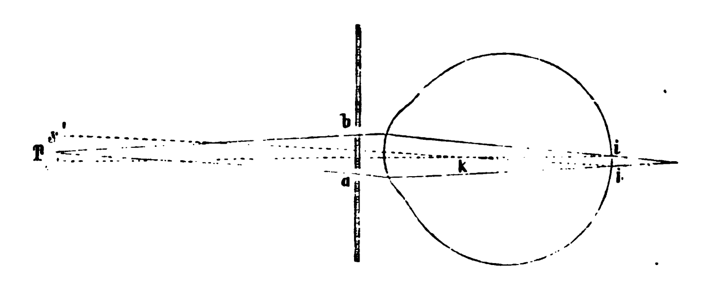
(§. 158), in einen einzigen Punkt zusammenziehen und die durch diesen Punkt (den sog. Kreuzungspunkt) gezogenen Geraden *Aa* und *Bb* (Fig. 152) als Richtungslinien bezeichnen, die durch die scheinbaren Orte der Objectpunkte gehen, deren Retinabilder in *a* und *b* liegen.

Obschon nun auf diese Weise eine örtliche Beziehung zwischen einem Objectpunkte und seinem Retinabilde besteht, so darf man doch nicht sagen, wie das früher geschah und hie und da auch wohl jetzt noch geschieht, dass nämlich das Auge den zu sehenden Punkt nach aussen setze, und zwar eben in einer Richtung, die von dem erregten Netzhautpunkte durch den Kreuzungspunkt nach aussen geht. Freilich ist es Thatsache, dass wir leuchtende Objecte in einer bestimmten räumlichen Anordnung ausser uns sehen, allein daraus folgt nicht, dass das Auge seine Erregungszustände oder die Seele ihre Lichtempfindungen nach aussen setze, was gar nicht gedenkbar ist; wohl aber bezieht die Seele ihre Empfindungen auf äussere Objecte und stellt sich diese, mittelst der Lichtempfindungen, auch als äussere in der ihnen wirklich zukommenden räumlichen Gestalt vor. Die Frage, auf welche Weise dies geschehe, können wir erst später beantworten; jetzt sei mit Rücksicht auf das Obige nur gesagt, dass der scheinbare Ort eines Objectpunktes bezüglich seines Retinabildes charakterisirt ist durch die von diesem Bilde durch den Kreuzungspunkt gezogene Richtungslinie, wobei es gleichgiltig ist, ob die Erregung der Netzhaut durch die Wellen des Lichtäthers oder durch eine sonstige mechanische Einwirkung herbeigeführt wird. Drücken wir den Augapfel von der Seite her, so bemerkt man einen lichten Kreis, aber nicht an der Druckstelle, sondern an der gegenüberliegenden Seite. Drückt man z. B. den rechten Augapfel mit einer Fingerspitze am äusseren Augenwinkel, so erscheint der Lichtkreis links in der Nähe des Nasenrückens; und umgekehrt findet sich dieser Lichtschein, wenn man den Augapfel am inneren Winkel (Nasenseite) drückt, rechts nach der Schläfenseite hin, u. s. f.

235. Belehrend in dieser Hinsicht sind auch die Doppelbilder im Scheiner'schen Versuche, deren scheinbare Lage sich in Uebereinstimmung mit dem Vorigen ergiebt. Man sieht also mit einem Auge durch zwei feine Oeffnungen nach einem Object *p*, wo dann zwei Scheinbilder *s* und *s'* sichtbar sind, wenn das Auge nicht für die Entfernung des Objects adaptirt ist. Im Falle,

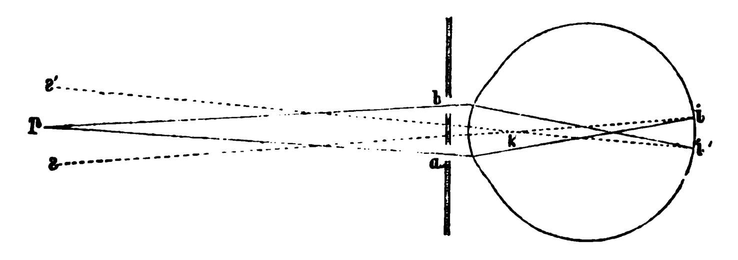
dass sich das Object diesseits der deutlichen Sehweite befindet, vereinigen sich die von ihm kommenden und durch die Oeffnungen

Fig. 153.



ausgesonderten feinen Lichtbündel hinter der Netzhaut, während auf dieser die Zerstreuungskreise *i*, *i* entstehen (Fig. 153). Die beiden Scheinbilder *s* und *s'* liegen dann in den Richtungslinien, die von den erregten Netzhautpunkten *i* und *i* durch den Kreuzungspunkt *k* gezogen und hier punktirt angegeben sind. Dem ganz entsprechend verschwindet, wenn man die eine Oeffnung schliesst, das Bild, welches auf der der anderen Oeffnung zugehörigen Seite liegt, z. B. das Bild *s'*, wenn man die Oeffnung *a* verdeckt. Liegt aber das Object *p* jenseits der deutlichen Sehweite, so durchkreuzen sich die beiden Lichtbündel vor der Netzhaut

Fig. 154.



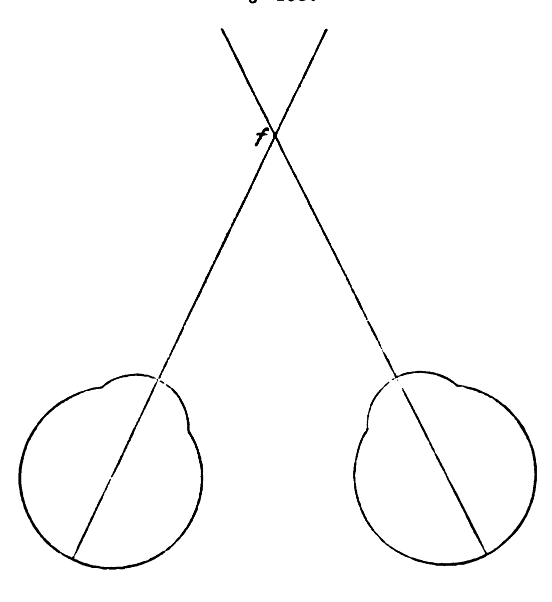
(Fig. 154), die in *i* und *i'* wieder von Zerstreuungskreisen afficirt wird. Man ziehe nun wieder durch den Punkt *k* die entsprechenden Richtungslinien (Sehstrahlen); dann entspricht dem Retinabilde *i* das äussere Scheinbild *s* und dem erregten Netzhautpunkte *i'* das Bild *s'*. Daher muss jetzt, falls man eine der Oeffnungen schliesst, das auf derselben Seite gelegene Bild verschwinden, d. h.

das Bild *s*, wenn *a*, und das Bild *s'*, wenn die Oeffnung *b* geschlossen wird. Und so findet es sich auch.

236. Wenn ein Object in beide Augen zugleich Lichtstrahlen sendet, entsteht auch in jedem Auge ein Retinabild desselben. Dessenungeachtet erscheint das Object unter gewöhnlichen Umständen einfach. Doch fehlt es in dem Falle, wo ein Gegenstand, auf den man gerade beide Augen richtet, einfach erscheint, fast niemals an matten Doppelbildern anderer Objecte, die freilich aus Gründen, die wir später anführen werden, meist nicht zum Bewusstsein kommen. Bei einiger Aufmerksamkeit gelingt es aber leicht, solche Doppelbilder eines und desselben Objects wahrzunehmen, wenn man sich nämlich in der längeren Fixation eines Objects geübt hat. Ein einfacher und bekannter Versuch, der hierher gehört, ist folgender. Man hält zwei Stäbe oder Finger in einer gewissen Entfernung hintereinander gerade vor das Gesicht und fixirt abwechselnd den einen und anderen; dann erscheint allemal der fixirte einfach, der nicht fixirte dagegen doppelt.

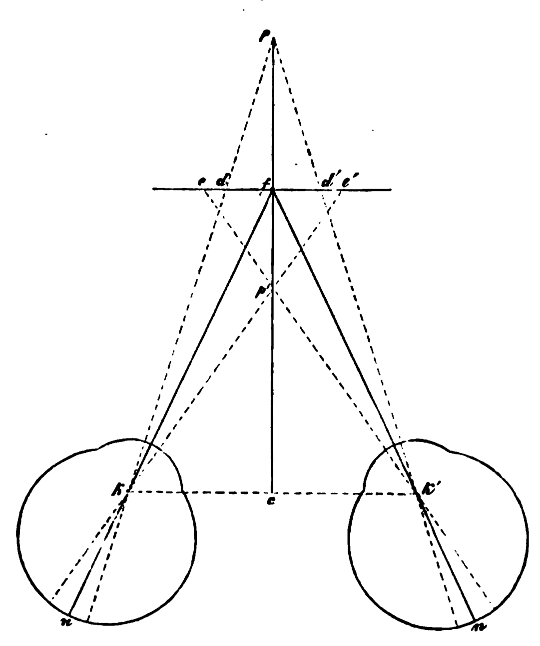
Gewiss sehen wir nun in unserem Gesichtsfelde einen Punkt einfach, wenn wir denselben fixiren, d. h. beide Augen so auf ihn richten, dass sich deren Axen in ihm schneiden oder durch-


Fig. 155.



kreuzen. In diesem Falle entsteht in jedem Auge ein scharfes Bild des fixirten Punktes auf der Mitte der Retina; und beide Bilder werden durch das Vorstellen auf denselben Punkt des Gesichtsfeldes projicirt. In Figur 155 ist f der Fixations- und Durchschnittspunkt beider Sehaxen, die hier einen Winkel miteinander bilden, den man gewöhnlich den Convergenzwinkel der Sehaxen, und mitunter wohl auch den parallaktischen Winkel nennt. Nun erscheint also der Fixationspunkt allemal einfach, dagegen was im Convergenzwinkel beider Sehaxen und in seinem Scheitelwinkel liegt, doppelt. Davon überzeugt man sich schon, wenn man die aufwärts gerichteten Schenkel eines geöffneten Zirkels gerade vor das Gesicht hält und die Spitze des einen, etwa des entfernteren, fixirt; der nähere wird dann doppelt erscheinen, und eben so auch irgend ein anderes Object, das weiter als die fixirte Spitze von den Augen absteht, z. B. der Schornstein oder das Fenster eines gerade gegenüberliegenden Hauses. Oder man befestige auf einem Brettchen in einem Abstande von etwa 2 Zoll drei Nadeln p, f, p' in gerader Linie, und halte diese letztere so,

Fig. 156.



dass sie gegen die Nasenwurzel gerichtet ist. Fixirt man nun eine dieser Nadeln, so erscheinen die anderen doppelt, und zwar die vorderste und hinterste, wenn man die mittlere fixirt. Diese letztere, die dann einfach erscheint und in der Figur durch f bezeichnet ist, liegt im Scheitel des Convergenzwinkels beider Sehaxen, die nähere p' innerhalb dieses Winkels und die entferntere p im Scheitelwinkel desselben. Durch abwechselndes Schliessen und Oeffnen des einen und anderen Auges erfährt man auch leicht, welches von den beiden Doppelbildern dem rechten oder linken Auge zugehört.

257. Aber auch Objecte, die ausserhalb des Convergenzwinkels und seines Scheitelwinkels liegen, können noch doppelt erscheinen, wie denn schon Vieth*) sagte: „Was im Scheitel des parallaktischen Winkels, d. h. des Winkels, der von den beiden Augenaxen gebildet wird, selbst liegt, wird bestimmt einfach gesehen; was innerhalb des parallaktischen Winkels und seines Scheitelwinkels liegt, wird bestimmt doppelt gesehen, und zwar gehen die Erscheinungen desto weiter auseinander, je weiter der Gegenstand vom Scheitel entfernt ist, sei es diesseits oder jenseits des Scheitels; was ausserhalb des parallaktischen Winkels und seines Scheitelwinkels liegt, wird, obwohl unbestimmt, einfach gesehen, wenn es nicht sehr nahe am Auge ist, in grosser Nähe aber auch unbestimmt doppelt."

Emsmann**) hat zur Anstellung hierauf bezüglicher Versuche eine einfache Vorrichtung unter dem Namen „Diplometer" angegeben. Indessen zeigt auch schon der folgende von demselben beschriebene Versuch die Duplicität eines ausserhalb des Convergenzwinkels der Sehaxen gelegenen Objects. Fixirt man nämlich ein entfernteres Object, etwa die Spitze eines Thurmes oder Schornsteines, während man ein Stäbchen, etwa ein Bleistift, in der Nähe des Auges hält; so erscheint das nähere Object doppelt, und zwar auch ausserhalb des Convergenzwinkels, den die Axen der nach dem entfernteren Object gerichteten Augen miteinander bilden. Die beiden Bilder des näheren Objects sind noch weit seitwärts vom Auge sichtbar, bis endlich bei einer Bewegung nach links das linke, dem rechten Auge zugehörige, Bild, und bei einer Bewegung

*) Gilbert's Annal. Bd. LVIII.
**) s. Poggend. Ann. Bd. XCVI. S. 588.

nach rechts das rechte, dem linken Auge zugehörige, Bild verschwindet, was im Allgemeinen eintritt, wenn die Halbirungslinie des Convergenzwinkels mit dem Lichtstrahle, welcher von dem seitwärts liegenden Punkte noch in das auf der anderen Seite befindliche Auge gelangt, einen Winkel von 45° einschliesst. Und der Grund ist, weil bei Schliessung des einen Auges in der Richtung vom geschlossenen Auge her nur von solchen Objecten Licht in das andere offene Auge fallen kann, welche von der auf der Verbindungslinie beider Augen im Halbirungspunkte errichteten Senkrechten nicht weiter als etwa 45° seitwärts liegen. —

Bei allen diesen Versuchen über Doppelbilder kommt es darauf an, die Fixation eines Objects fest einzuhalten, während sich die Aufmerksamkeit den anderen nicht fixirten Objecten zuwendet.

238. Es erhebt sich die Frage, welche Punkte im Raume mit dem fixirten Punkte zugleich von beiden Augen noch einfach gesehen werden. Der Inbegriff aller dieser Punkte, mögen sie nun zusammen eine Linie oder Fläche darstellen, ist der sog. Horopter, — ein Ausdruck, der von Franc. Aguilonius*) eingeführt wurde. Dieser Physiker bezeichnete damit die gerade Linie, welche durch den fixirten Punkt parallel mit der Verbindungslinie beider Augenmittelpunkte geht. In dieser Linie haben nach ihm alle gesehenen Punkte ihren wahren oder scheinbaren Ort, woraus er denn weiter folgert, dass alle Punkte, die wirklich in derselben liegen, einfach, dagegen alle übrigen, die nur ihren scheinbaren Ort darin haben, doppelt gesehen werden müssen. Später nahm man jedoch das Wort „Horopter" lediglich in dem obigen Sinne, indem man also damit denjenigen Theil des Raumes bezeichnete, welcher alle Punkte enthält, die zugleich mit dem fixirten Punkte einfach erscheinen.

In eine neue Bahn wurde die Lehre vom Einfach- und Doppeltsehen, und damit auch die Lehre vom Horopter, durch den Physiologen Joh. Müller**) gelenkt, der nachzuweisen suchte, dass das Einfachsehen mit beiden Augen an bestimmte Stellen beider Netzhäute geknüpft sei, dergestalt, dass je zwei bestimmte Netzhautstellen eine und dieselbe Ortsempfindung vermitteln, wenn sie von den Strahlen eines und desselben Objects afficirt werden. Man

---

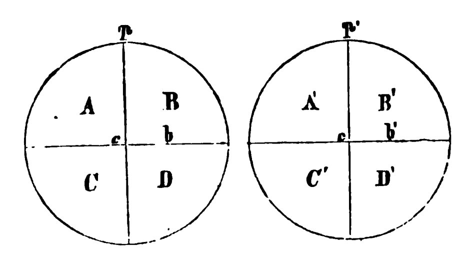
*) Opticorum libri sex. Antverpiae MDCXIII. Lib. II.

**) Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig 1826.

nennt solche Stellen identische, auch correspondirende oder zugeordnete Netzhautpunkte. Hiernach entsprechen sich in beiden Augen bestimmte Stellen, die, wenn sie z. B. gleichzeitig gedrückt werden, nur eine und dieselbe Lichtfigur, an demselben Orte des subjectiven Sehfeldes gelegen, darbieten, während andere Stellen beider Augen, wenn sie afficirt werden, örtlich verschiedene Bilder gewähren, deren Entfernung im Sehfelde um so mehr beträgt, je weiter in einem Auge die Druckstelle von derjenigen Stelle entfernt liegt, mit welcher die gedrückte Stelle des anderen Auges correspondirt.

Nun ist im Allgemeinen die obere Seite der einen Netzhaut identisch mit der oberen Seite der anderen, ebenso die untere Seite der einen mit der unteren Seite der anderen, weiter die rechte mit der rechten, und endlich die linke Seite der einen mit der linken der anderen. Betrachtet man aber die beiden Netzhäute als Kugelflächen und theilt sie durch einen horizontalen und vertikalen Meridian in 4 Quadranten, so sind zunächst identisch die beiden von den Sehaxen getroffenen Mittelpunkte; daher ein Objectpunkt, dessen Bild auf diese Mittelpunkte fällt, einfach erscheinen wird. Dann sind auch identisch je zwei Punkte, die in gleicher Entfernung und in derselben Richtung vom Mittelpunkte lie-

Fig. 157.

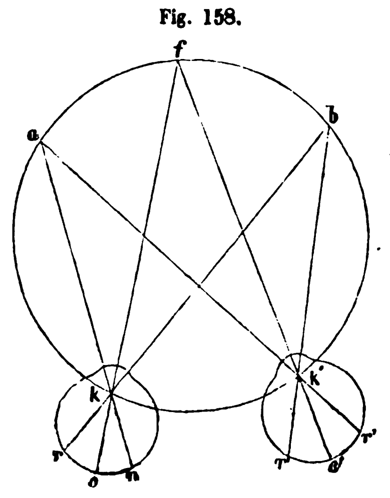


gen, so z. B. auf dem horizontalen Meridian die Punkte *b* und *b'*, falls ihre Entfernung von dem betreffenden Retinamittelpunkte gleich gross ist. Denkt man sich nun beide Meridiane, den horizontalen und vertikalen, in Bezug auf die Mitte der Retina, in Grade eingetheilt, so werden die gleichnamigen Gradzahlen auf je zwei entsprechenden Meridianstücken, z. B. auf *cp* und *cp'*, identische Netzhautstellen bezeichnen. Im Allgemeinen ist aber der Quadrant *A* identisch mit dem Quadranten *A'*, *B* mit *B'*, *C* mit *C'*, und endlich *D* mit *D'*.

Somit entspricht jedem Netzhautpunkte des einen Auges eine bestimmte Stelle des anderen, die mit ihm dieselbe Ortsempfindung vermittelt, während dies für alle anderen Stellen der zweiten Netzhaut nicht geschieht. Darum nennt man auch, im Gegensatze zu den identischen oder correspondirenden Netzhautpunkten, je zwei solche Stellen beider Netzhäute, deren Erregungen nicht zu einer einheitlichen Ortsempfindung führen, differente Netzhautpunkte.

239. Unter der Voraussetzung, dass die als sphärisch angenommene Krümmung der Retina in der Ebene der beiden Sehaxen auf der äusseren und inneren Hälfte, von der Mitte des gelben Flecks an gerechnet, gleich sei, zeigte Joh. Müller durch geometrische Construction, dass die Punkte, welche mit dem fixirten Punkte zugleich noch einfach gesehen werden, in der Peripherie eines Kreises liegen, der durch den fixirten Punkt und die Mittelpunkte der beiden Linsen (oder wie man später feststellte) durch die Kreuzungspunkte der Richtungslinien beider Augen geht. In Figur 158 sind k, k' die Kreuzungspunkte beider Augen, während

Fig. 158.



f den Fixationspunkt bezeichnet, worin sich die Sehaxen schneiden. Denkt man sich nun von irgend welchen Peripheriepunkten, z. B. von a und b, die betreffenden Richtungslinien gezogen; so ist, wie aus geometrischen Gründen sehr leicht erkennbar, $nkc = n'k'c'$ und $ckr = c'k'r'$, d. h. n und n' sowohl als auch r und r' sind identische (correspondirende) Netzhautpunkte, und die Object-

punkte *a* und *b* erscheinen mit *f* zugleich einfach, weil die Bilder eines jeden in beiden Augen auf correspondirende Netzhautstellen fallen, was auch ebenso von allen anderen Punkten des besagten Kreises gilt, den Müller darum den Horopter nennt.

Die Beweisführung Müller's stützt sich, wie bereits hervorgehoben wurde, auf die Voraussetzung einer vollkommenen Gleichheit eines horizontalen mittleren Netzhautdurchschnittes auf der äusseren und inneren Seite vom Mittelpunkte an gerechnet. Und im Hinblick auf die Möglichkeit, dass die Anordnung der identischen Stellen in vertikaler Richtung derjenigen in horizontaler Richtung entspreche, wurde hin und wieder die Vermuthung ausgesprochen, dass alle mit dem Fixationspunkte zugleich einfach gesehenen Objectpunkte auf der Oberfläche einer Kugel liegen müssten, deren horizontaler Aequator jene zuvor betrachtete Kreislinie sei, oder, mit anderen Worten, dass die Horopterfläche eine Kugelschale darstelle.

241. Nach einer Bemerkung von Meissner*) war es zuerst Baum, dem sich Zweifel an der Richtigkeit der Annahme eines kreisförmigen Horopters aufdrängten. Ein Factum aus der Entwickelungsgeschichte des menschlichen Auges brachte ihm zunächst die Vermuthung einer etwas verschiedenen Krümmung der Retina auf der äusseren und inneren Seite, und spätere Versuche bestätigten ihm seine Zweifel an der bisher angenommenen kreisförmigen Gestalt des Horopters.

Neuerdings hat nun Meissner**) die Lehre vom Horopter einer sehr sorgfältigen Untersuchung unterworfen, die im Anschluss an die Lehre von den identischen Netzhautpunkten zu bestimmteren Aufschlüssen über die Gestalt des Horopters führte.

Mit dem Worte „Horopter" bezeichnet Meissner, in Uebereinstimmung mit der gewöhnlichen Definition, nur in einem etwas weiteren Sinne, den Theil des Raumes, welcher alle Punkte enthält, die gleichzeitig mit dem fixirten Punkte einfach gesehen werden. Der Mittelpunkt dieses einfach gesehenen Theiles, der zunächst als eine irgendwie gestaltete Fläche gedacht wird, ist der Fixationspunkt. Denkt man sich durch den letzteren in der bezeichneten Fläche einen horizontalen und vertikalen Schnitt gelegt, so wird die Kennt-

*) Beiträge zur Physiologie des Sehorgans. Leipzig 1854. S. 5.

**) Eben da.

niss dieser Schnitte, von denen jener die horizontale, der andere die vertikale Horopterlinie heissen mag, 'genügende Auskunft über die Beschaffenheit der Fläche selbst geben.

Eine durch die beiden Sehaxen gelegte Ebene, worin stets der fixirte Punkt liegt, nennt Meissner mit Baum die Visirebene, und den Punkt des deutlichsten Sehens, auf welchen in jedem Auge das Bild des fixirten Punktes fällt, den Mittelpunkt der Retina.

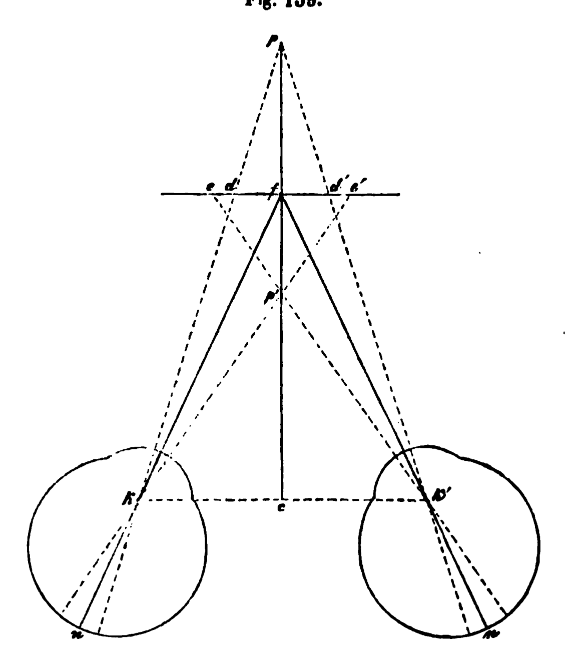
Die Visirebene schneidet aber jede Netzhaut in einer durch den Mittelpunkt gehenden Linie, welche Meissner den horizontalen Meridian nennt. Diese Linie ist unabhängig von Netzhautstellen bestimmter physiologischer Dignität; nur der Mittelpunkt der Netzhaut liegt stets in derselben, während sie bei gewissen auf die optische Axe reducirten Drehungen der Netzhaut in verschiedenen Momenten durch verschiedene Reihen von Retinapunkten verlaufen wird. — Eine durch die Sehaxe senkrecht zur Visirebene gelegte Ebene schneidet die Netzhaut in dem vertikalen Meridiane, der, wie der horizontale, von Netzhautstellen bestimmter physiologischer Dignität unabhängig ist. Ferner wird eine die beiden Kreuzungspunkte der Richtungslinien verbindende Gerade die Grundlinie genannt; und endlich heisst eine durch den Mittelpunkt der Grundlinie gehende zur Visirebene und Grundlinie senkrechte Ebene die vertikale Medianebene.

In Figur 159 bezeichnet kk' die Grundlinie, c ihre Mitte, cp die Durchschnittslinie der vertikalen Medianebene mit der Visirebene, und f den Fixationspunkt. Ein jenseits f gelegener Punkt p erscheint doppelt, und zwar gehört das links vom fixirten Punkt f erscheinende Bild dem linken Auge, das rechts erscheinende aber dem rechten Auge an. Diese Doppelbilder nennt Meissner rechtseitige, zur Unterscheidung von den Doppelbildern, die ein diesseits f gelegener Punkt p' zeigt: hier gehört das links erscheinende Bild dem rechten Auge, und das rechte dem linken Auge an; daher sie Meissner verkehrte Doppelbilder nennt.

241. Nun ist f (Fig. 159) vorläufig der einzige bekannte und in Betracht kommende Punkt des Horopters. Die Bilder dieses Punktes liegen in beiden Augen auf der Mitte n der Netzhaut, die des doppelt gesehenen Punktes aber in dem einen rechts, in dem anderen links vom Mittelpunkte n. Bezieht man nun die erscheinenden Doppelbilder der Punkte p, p' auf die gerade Linie, welche durch den Fixationspunkt parallel zur Verbindungslinie bei-

Kreuzungspunkte k, k' geht; so lassen sich, wie Meissner zeigt, ıt die Entfernungen dieser Bilder voneinander und von dem

Fig. 159.



ıtionspunkte bestimmen. Die Doppelbilder des Objectpunktes p l d und d', die des näher gelegenen p' aber e und e'. Nun die Länge der Linie dd' das Mass für die Entfernung zwischen beiden Doppelbildern d, d'. Diese Entfernung nimmt mit fp und ab, und zwar ist, mit Rücksicht auf die Dreiecke kpk' und ': $\frac{fd}{kc} = \frac{fp}{cp}$ oder $\frac{dd'}{kk'} = \frac{fp}{cp}$.

Wenn nun der fixirte Punkt dem Auge sehr nahe und der ıkt p sehr weit von demselben entfernt liegt, so dass cp gewissmassen unendlich gross gegen cf ist; dann lässt sich auch fp unendlich lang ansehen, und es ist $dd' = kk'$, d. h. wenn der ıkt p unendlich weit entfernt, der Fixationspunkt f aber sehr ıe liegt, so ist die Entfernung der Doppelbilder voneinander ch der Grundlinie kk'. Hiermit ist die grösste Entfernung geen, welche rechtseitige Doppelbilder voneinander haben können. ls fp gleich der Entfernung des Fixationspunktes von der Grund-



linie, ist die Entfernung dd' = der Hälfte der Grundlinie. Für die letztere kann man allenfalls die Entfernung der Mittelpunkte der Pupillen bei parallel gerichteten Sehaxen nehmen, während sich der Abstand der Doppelbilder voneinander, nach Baum, mittelst eines in der Entfernung des Fixationspunktes gehaltenen Massstabes messen lässt.

Das Mass für den Abstand der verkehrten Doppelbilder des Punktes p' ist die Länge der Linie ee', die kleiner wird, wenn p' dem Fixationspunkte f näher rückt, und um so grösser ist, je kleiner cp'. Man hat $\frac{fe}{kc} = \frac{fp'}{cp'}$ oder $\frac{ee'}{kk'} = \frac{fp'}{cp'}$, wonach $ee' = kk'$ wird, wenn p' gerade in der Mitte zwischen dem fixirten Punkte f und dem Mittelpunkte c der Grundlinie liegt. — Für den Abstand dieser Doppelbilder gibt es aber nicht, wie bei den obigen rechtseitigen, einen Grenzwerth.

Ausserdem findet sich noch leicht, dass, wenn die Entfernung der Punkte p und p' von dem fixirten Punkte f gleich gross ist, die Doppelbilder des näher gelegenen Punktes p' weiter auseinander liegen, als die des entfernteren p.

242. Aus Meissners*) Untersuchung folgt, dass die Erscheinung der Doppelbilder sowohl wie die Beschaffenheit des Horopters in nahem Zusammenhange mit der Bewegung der Augen steht, und nicht nur abhängig von dem Convergenzwinkel der Sehaxen, sondern auch von dem Neigungswinkel derselben gegen den Horizont ist. Während aber der Convergenzwinkel lediglich aus der Wirkung der Augenmuskeln resultirt und leicht durch Messung der Entfernung des Fixationspunktes bestimmbar ist, verhält es sich anders mit dem Neigungswinkel der Sehaxen oder, was dasselbe, mit der Neigung der Visirebene, die sowohl von den Bewegungen der Augen als auch des Kopfes abhängig ist. In den nacherwähnten Versuchen Meissner's ist zunächst eine aufrechte Kopfstellung vorausgesetzt, in der Art, dass die Visirebene mit der Horizontalebene zusammenfällt.

In der Visirebene befindet sich nun, etwa 8—10 Ctm. von der Grundlinie kk' entfernt, der Fixationspunkt f, und etwa 2 Ctm. von demselben ein anderer Punkt p in gleichem Abstande von beiden Augen. Wird dieser Punkt, der in rechtseitigen Doppelbildern erscheint,

*) a. a. O. S. 11 ff.

bei andauernder Fixation des Punktes *f* allmälig vertikal aufwärts bewegt, d. h. in einer zur Visirebene senkrechten Richtung *pq*, so rücken die Doppelbilder einander immer näher und kommen end-

Fig. 160.

lich zum Decken, wo dann der Punkt *p* einfach gesehen wird. Wenn sich aber der letztere in derselben Richtung noch höher aufwärts bewegt, erscheinen die Doppelbilder wieder, sich allmälig immer weiter voneinander entfernend, und zwar sind es jetzt verkehrte Doppelbilder, wie man bei Schliessung des einen Auges findet. Der Ort nun, wo der Punkt bei seiner aufwärts gerichteten Bewegung einfach erscheint, gehört dem Horopter an; der Punkt schneidet hier die mittlere vertikale Durchschnittslinie desselben. Die verkehrten Doppelbilder oberhalb dieses Ortes deuten aber darauf hin, dass der bewegte Punkt vor dem Punkt des Horopters liegt, der sich mit ihm in gleicher Höhe befindet, und das zunehmende Auseinandergehen der Doppelbilder ist ein Zeichen, dass das bewegte Object sich vom Horopter entfernt. Ist in Fig. 160 *l* der Ort, wo der Punkt auf seinem senkrechten Wege einfach erscheint, so hat man nunmehr zwei Punkte der vertikalen Horopterlinie, nämlich *f* und *l*. Bewegt sich dagegen der Punkt *p* aus der Visirebene vertikal abwärts, so weichen die

Doppelbilder immer weiter auseinander, bis *p* über die Grenze des Gesichtsfeldes hinausgerückt ist. In diesem Falle bleibt *p* nicht allein stets hinter dem Horopter, sondern entfernt sich auch von diesem immer weiter, je tiefer er unter die Visirebene hinabsinkt.

Bewegt sich aber ein Punkt p', der vor dem Fixationspunkte *f* liegt, in einer zur Visirebene senkrechten Richtung $q'r'$ auf und ab, so werden in jenem Falle die Doppelbilder, bis zum Verschwinden des Objects aus dem Gesichte, immer weiter auseinander rücken, wogegen im anderen Falle, wenn sich das Object abwärts bewegt, die Entfernung der Doppelbilder immer kleiner wird, bis diese sich decken und das Object einfach erscheint. Sei in Fig. 160 der Ort, wo dies geschieht, durch den Punkt *m* bezeichnet. Geht nun die Bewegung abwärts über diesen Punkt *m* hinaus, dann erscheinen die Doppelbilder, jedoch als rechtseitige, wieder.

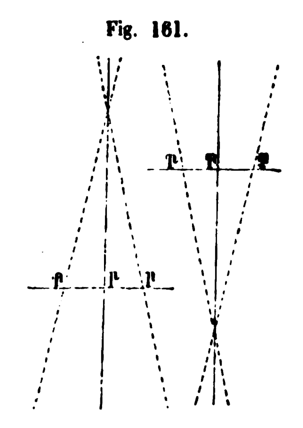
Sonach hat man drei Punkte der mittleren vertikalen Horopterlinie, nämlich *l*, *f* und *m*. Diese Linie entfernt sich jenseits des Punktes *l* von den Augen, während sie sich diesseits des Punktes *m* denselben nähert.

243. Anstatt einen Punkt auf bestimmten Wegen fortrücken zu lassen, können diese Wege, wie Meissner*) bemerkt, selbst benutzt werden, indem man nämlich Linien nimmt und deren Doppelbilder untersucht. Und in der That kann man sich mittelst eines feinen Drahtes, der gegen das übrige Gesichtsfeld genügend absticht, leicht von den Hauptresultaten des obigen Versuches überzeugen. Ist also *rq* senkrecht auf der Visirebene (Fig. 160) ein feines Stäbchen, so formiren die Doppelbilder desselben zusammen ein Kreuz; und zwar convergiren die Bilder des oberhalb der Visirebene gelegenen Stabtheiles nach einem gewissen Punkte, über welchen hinaus sie als verkehrte Doppelbilder divergiren, während die Bilder des unteren Stabtheiles nach unten divergiren. So stellen sich also die Doppelbilder des Stabes *rq* wie in Figur 161 (Nr. 1) dar, wo *p*, *p*, die Doppelbilder des in der Visirebene gelegenen Stabpunktes *p* bezeichnen. Steht der Stab in $r'q'$ vor dem fixirten Punkte *f*, so convergiren die Doppelbilder nach einem unter der Visirebene gelegenen Punkte (Nr. 2), über den

*) a. a. O. S. 14 ff.

hinaus sie als rechtseitige Doppelbilder divergiren. Der Stab schneidet in den Punkten *l* und *m* den Horopter, insofern hier die Doppelbilder desselben sich decken, und zwar mit zwei gleichen einem und demselben Punkte des Objects entsprechenden Punkten, was erforderlich ist, wenn daselbst ein wirkliches Einfachsehen stattfinden soll.

Fig. 161.



244. Dass nun die drei Punkte *l*, *f*, *m* in einer Geraden liegen, lässt sich nach Meissner am einfachsten auf indirectem Wege erkennen. Erhält nämlich der Stab eine solche Lage, dass er bei fortgesetzter Verlängerung weder oberhalb noch unterhalb den Horopter schneidet, also diesem parallel ist; dann werden seine Doppelbilder ebenfalls untereinander parallel erscheinen, indem der Abstand der Doppelbilder aller Punkte gleich ist. Wenn daher einer geraden Linie, deren Stelle der Stab vertritt, eine derartige Lage ertheilt werden kann, dass ihre Doppelbilder als parallele Linien erscheinen, und sie selbst, die Linie, also parallel dem Horopter verläuft; so lässt sich daraus folgern, dass die vertikale Durchschnittslinie des Horopters auch eine gerade Linie ist. Falls jene Linie eine Curve wäre, könnten natürlich nur die Doppelbilder einer dieser Curve parallel gekrümmten Linie als zwei gerade parallele Linien erscheinen. Auch folgt aus dem Umstande, dass man einen zum Theil oberhalb, theils unterhalb der Visirebene befindlichen Stab bis zum Parallelismus der Doppelbilder neigen kann, mit Bestimmtheit, dass die vertikale Horopterlinie nicht eine in der Visirebene, nämlich im Punkte *f*, gebrochene Linie darstellt, sondern dass eben *l*, *f*, *m* in einer Geraden liegen. Meissner*) befestigte zu einigen hierhergehörigen Versuchen einen Streifen dicken Papiers, auf dem eine die Stelle des obigen Stabes vertretende Linie gezeichnet war, so an den Mittelpunkt eines in Grade getheilten Kreises, dass der Streifen um eine in der Visirebene festliegende Axe gedreht, und somit der

*) a. a. O. S. 19.

Linie jede beliebige Neigung zur Visirebene ertheilt werden konnte. Die Versuche entsprachen der Erwartung.

Ist das Stäbchen (oder die Linie) im Fixationspunkte *f* selbst senkrecht zur Visirebene errichtet, so darf, dem Obigen gemäss, kein Punkt des Stabes einfach erscheinen; der letztere muss sich in der Form eines Kreuzes darstellen. Dies findet nun auch statt, obgleich die Erscheinung bei horizontaler Visirebene wenig auffällt; doch ist sie, wenn der Fixationspunkt der Grundlinie sehr nahe liegt, sehr wohl zu erkennen. Ein vertikal vor der Grundlinie aufgespannter dünner Faden ist hierzu genügend. Wenn man diesen Faden anfänglich vorwärts, mit dem oberen Theil den Augen zu, neigt, bemerkt man eine ziemliche Divergenz der Doppelbilder, die zwar geringer wird, wenn man den Faden allmälig in die senkrechte Stellung bringt, aber auch hier noch merklich wahrnehmbar ist. Geht man jedoch mit dem Faden über die vertikale Stellung hinaus, indem man den oberen Theil desselben von den Augen hinwegneigt, so erscheinen endlich alle seine Punkte mit dem fixirten Punkte zugleich einfach, d. h. er liegt nun im Horopter.

245. Sehen wir nun mit Meissner*), welche Verhältnisse aus den Resultaten der obigen Versuche für die entsprechenden Punkte beider Netzhäute folgen. Die untenstehenden Kreise bezeichnen die Projectionen der beiden Netzhäute oder ihres mittleren Theiles, die Punkte *a*, *α* ihre beiden physiologischen Mittelpunkte, d. h.

Fig. 162.

*) a. a. O. S. 22.

die Punkte des deutlichsten Sehens, EF und GH die Projectionen der beiden horizontalen grössten Kreise, d. h. die beiden horizontalen Meridiane, und senkrecht zu diesen AB und CD die beiden vertikalen Meridiane. Sei nun, wie in dem obigen Versuche (§. 242 f.), bei horizontaler Visirebene ein etwa 20 Ctm. entfernter Punkt f fixirt, und hinter demselben ein Stab, senkrecht zur Visirebene in der durch cp gehenden Medianebene, aufgestellt. Nun fallen die Retinabilder aller in der Visirebene gelegenen Punkte auf die horizontalen Meridiane EF und GH, und zwar die Bilder des fixirten Punktes f auf a und α. Dagegen fällt das Retinabild des Stabpunktes p, der in der Visirebene liegt, in beiden Augen gleichweit vom Mittelpunkte (a, α) auf den horizontalen Meridian nach innen (Nasenseite). Sind hiernach b und β die Retinabilder des Punktes p, so bezeichnet $ab + \alpha\beta$ die Entfernung der Doppelbilder, welche der Punkt p des Stabes darbietet. Das Retinabild des senkrecht auf der Visirebene stehenden Stabes rq, dessen oberen Theil pq wir hier betrachten, liegt in beiden Augen beziehungsweise in einem durch die Punkte b, β vertikal gelegten grössten Kreise, falls man die Retina einstweilen als sphärisch gekrümmt voraussetzt. Indessen ist es hier, wo nur ein kleiner mittlerer Theil der Retina in Betracht kommt, erlaubt, von der Krümmung der Retina ganz abzusehen und letztere als eine ebene Fläche zu nehmen. Dann sind die Linien bc und $\beta\gamma$ die Retinabilder des Stabes pq (in Fig. 160).

Aus den obigen Versuchen (§. 243) ergab sich nun, dass die Doppelbilder des Stabes pq nach einem oberhalb der Visirebene gelegenen Punkte convergiren, woselbst sie sich kreuzen und als sog. verkehrte Doppelbilder auseinandergehen. Die Entfernung der Doppelbilder des Stabpunktes p entspricht der Summe $ab + \alpha\beta$ (Fig. 162). Und diese Entfernung würde beim Parallelismus der Doppelbilder des Stabes pq für alle Punkte desselben gelten, wo dann die Retinabilder bc und $\beta\gamma$ in jedem Punkte gleich weit von den vertikalen Meridianen AB und CD beider Netzhäute abstehen würden. Die vertikalen Meridiane entsprächen in diesem Falle der mittleren vertikalen Horopterlinie im Raume; sie enthielten der Reihe nach durchweg je zwei identische Netzhautpunkte, oder AB und CD wären die (von Ruete so genannten) vertikalen Trennungslinien je zwei identischer Netzhauthälften, wobei noch zu erinnern, dass die vertikalen Meridiane wie



die dazu senkrecht verlaufenden horizontalen *EF* und *GH*, unabhängig von Punkten bestimmter physiologischer Dignität, eine feste Lage haben, während die ebenfalls zueinander senkrechten, sog. horizontalen und vertikalen, Trennungslinien, durch welche die Netzhäute in vier Quadranten getheilt werden, gerade Punkte bestimmter physiologischer Dignität bezeichnen, und je nach der Drehung der Augen ihre Lage gegen die festen Meridiane verändern. Die Meridiane sind stets, bei jeder Lage der Trennungslinien, wirklich vertikal und horizontal in Bezug auf die Visirebene, was von den Trennungslinien nicht gilt. Im gegenwärtigen Falle sind die vertikalen Trennungslinien durch die Linien *tm* und *ln* (Fig. 162) bezeichnet, die der mittleren vertikalen Horopterlinie entsprechen. Angenommen nämlich, dass gerade der obere Punkt *q* des Stabes *pq*, als Kreuzungspunkt der Doppelbilder, im Horopter liegt, so sind die Punkte *c* und *γ* identische Netzhautstellen in den vertikalen Trennungslinien *tm* und *ln*, deren Richtung, wie die der Horopterlinie selbst, durch zwei Punkte, nämlich hier durch die Punkte *a*, *c* und *α*, *γ* bestimmt ist.

246. Die Retinabilder des unterhalb der Visirebene gelegenen Stabtheiles *pr* (Fig. 160) fallen, wegen der umgekehrten Lage der Bilder auf der Retina, in die Verlängerungen der Linien *bc* und *βγ* (Fig. 162) aufwärts, und entfernen sich daher immer weiter von den Trennungslinien *tm* und *ln*; es wächst also der Abstand der gesehenen Doppelbilder voneinander, oder, mit anderen Worten, diese Doppelbilder divergiren, wie man es im Versuche findet. Dagegen liegen die Retinabilder des über den Kreuzungspunkt *q* hinausreichenden Stabtheiles in den nach unten verlängerten Richtungen der Linien *bc* und *βγ*; sie liegen so, als ob sie von einem vor dem fixirten Punkte gelegenen Object herrührten, von *c* und *γ* an abwärts auf der äusseren (Schläfen-) Seite der die vertikale Horopterlinie vorstellenden vertikalen Trennungslinien *tm* und *ln*. Neigt man nun den Stab so, dass sein oberes Ende sich weiter von den Augen entfernt, so rückt der Kreuzungspunkt der Doppelbilder höher hinauf, während sich die Punkte *c* und *γ* der Retinabilder nach innen (nasenwärts) bewegen, wobei die Richtung der Retinabilder des ganzen Stabes sich allmälig der Richtung der Trennungslinien nähert. Und im Falle des Parallelismus beider Richtungen sind sämmtliche Punkte der Retinabilder *bd* und *βδ* gleichweit, und zwar um $ab = αβ$ von den zugehörigen

Punkten der Trennungslinien entfernt, so dass nun die Doppelbilder parallel erscheinen.

Eben so nun findet sich auch, wenn man die Verhältnisse der Retinabilder *ef* und *sφ* zu den Trennungslinien *tm* und *ln* betrachtet, die Erklärung jener Erscheinungen, die man an den Doppelbildern eines vor dem Fixationspunkte senkrecht auf der Visirebene stehenden Stabes beobachtet.

Hat man durch den Versuch die Neigung bestimmt, welche man dem Stabe geben muss, damit seine Bilder parallel erscheinen, so lässt sich die Neigung der Trennungslinien gegen den horizontalen Meridian durch Rechnung ermitteln*).

247. Um aber zu erfahren, wie sich die Neigung des Horopters und die Richtung der beziehungsweise vertikalen Trennungslinien der Netzhäute bei verschiedenen Augenstellungen verhalten, reflectirte Meissner zunächst auf die symmetrischen Bewegungen beider Augen, d. h. auf diejenigen Bewegungen, bei welchen der Fixationspunkt von den Kreuzungspunkten der Richtungslinien beider Augen stets gleich weit entfernt ist, und also immer in der vertikalen Medianebene liegt. In Betrachtung kommen hierbei Convergenzbewegungen der Sehaxen und Neigungsbewegungen derselben gegen den Horizont, welche letztere man, um der Kürze willen, mit Meissner Neigungen der Visirebene nennen kann. Zuvörderst wurden die verschiedenen Convergenzwinkel der Sehaxen bei horizontaler Visirebene berücksichtigt, wo sich dann ergab, dass der Horopter bei fortwährender Zunahme der Sehweite (Entfernung des Fixationspunktes) sich endlich der zur Visirebene senkrechten Richtung nähert, die erreicht ist, sobald die vertikale Trennungslinie der Retina mit dem vertikalen Meridian zusammenfällt; d. h. wenn die Sehaxen, bei horizontaler Visirebene, nahezu oder wirklich parallel gerichtet sind, steht der Horopter senkrecht auf der Visirebene, was auch noch für jede Neigung der letzteren gegen den Horizont gilt, so lange nämlich die Sehaxen zueinander parallel bleiben**).

Wenn aber bei gleichbleibender Entfernung des Fixationspunktes und des mehr erwähnten Stabes die Visirebene aus der horizontalen Lage aufwärts geneigt wird, so convergiren die



*) s. Meissner a. a. O. S. 26 ff.

**) Vergl. hierüber die von Meissner aufgestellten Tabellen, S. 39 ff. u. 42 f.

Doppelbilder des Stabes unter einem immer wachsenden Winkel, d. h. immer mehr nach einem der Visirebene näher gelegenen Punkte (Fig. 161); und demgemäss nimmt der Winkel zu, um welchen man den Stab aus der senkrechten Richtung, in Bezug auf die Visirebene, drehen muss, damit seine Doppelbilder parallel erscheinen. Daraus folgt aber auch, dass der Winkel, um welchen die Trennungslinien der Netzhäute von der Richtung der vertikalen Meridiane abweichen, zunimmt, wenn die Sehaxen aufwärts geneigt werden. Dagegen nimmt der Covergenzwinkel der Doppelbilder ab, wenn die Visirebene unter denselben Umständen aus der horizontalen Lage abwärts geneigt wird; und so wird auch der Winkel immer kleiner, um welchen der Stab aus der vertikalen Richtung zu drehen ist, damit seine Bilder parallel erscheinen, woraus zu schliessen, dass bei abwärts gerichteten Sehaxen die vertikalen Trennungslinien der Netzhäute sich der Richtung der Meridiane nähern, und die Neigung des Horopters in Bezug auf die Visirebene abnimmt. Ist die Visirebene zwischen 40 und 50° unter den Horizont geneigt, so erscheinen die Doppelbilder des senkrecht stehenden Stabes untereinander parallel: die vertikalen Trennungslinien fallen mit den Meridianen zusammen und der Horopter steht senkrecht auf der Visirebene.

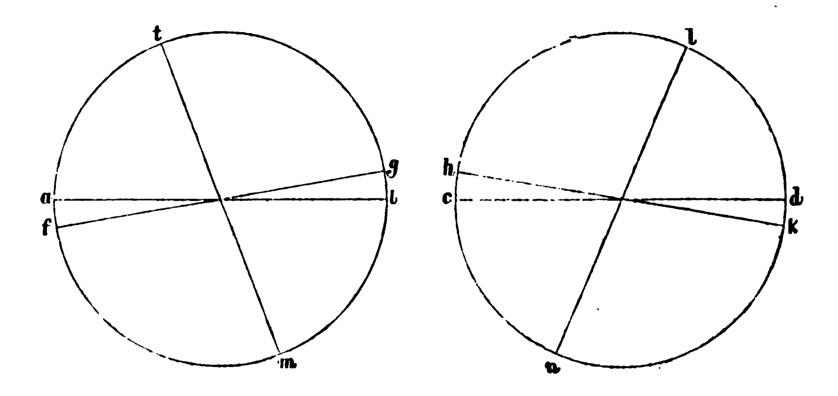
Das Resultat aus dem Bisherigen ist, „dass der mittlere vertikale Hauptdurchschnitt eine gerade Linie ist, deren Neigung zur Visirebene abhängt von der Neigung der vertikalen Trennungslinien identischer Netzhauthälften zu den horizontalen Meridianen beider Netzhäute, und in anderer, doch hier mehr untergeordneter, Weise von der Entfernung des Fixationspunktes. Die Richtung des Horopters ist aber senkrecht zur Visirebene und die der vertikalen Trennungslinien zu den horizontalen Meridianen: 1) wenn die Sehaxen, bei beliebiger Neigung derselben gegen den Horizont, untereinander parallel sind, und 2) bei 45° Neigung der Sehaxen unter den Horizont, welches auch der Convergenzwinkel derselben sein mag."

248. Wenden wir uns ferner mit Meissner*) zur Betrachtung des mittleren horizontalen Durchschnittes des Horopters, also desjenigen Theiles des letzteren, welcher in der Visirebene selbst gelegen ist. Die beiden Kreise in Figur 163

*) a. a. O. S. 47 ff.

bezeichnen wieder die Projectionen der beiden Netzhäute, die Linien *tm* und *ln* die vertikalen Trennungslinien, welche die Netzhäute

Fig. 163.



in zwei entsprechende, identische Hälften (Aussen und Innen) theilen, und die also nur dann senkrecht zu den horizontalen Meridianen *ab* und *cd* stehen, wenn die Sehaxen entweder parallel gerichtet oder 45⁰ unter den Horizont geneigt sind. Denselben Drehungen wie diese vertikalen Trennungslinien sind natürlich auch die horizontalen Trennungslinien *fg*, *hk* (Fig. 163) unterworfen, durch welche die Netzhäute ebenfalls in zwei entsprechende, identische Hälften (Oben und Unten) getheilt werden. Fallen nun die vertikalen Trennungslinien mit den vertikalen Meridianen zusammen, so werden auch die horizontalen Trennungslinien mit den horizontalen Meridianen zusammenfallen, und dies wird nach den früheren Betrachtungen eben dann geschehen, wenn die Sehaxen parallel oder 45⁰ unter den Horizont geneigt sind. In allen übrigen Augenstellungen wird die horizontale Trennungslinie mit dem horizontalen Meridian einen Winkel bilden, der gleich ist dem Winkel der vertikalen Trennungslinie mit dem vertikalen Meridian. Nun fallen die Retinabilder aller Punkte der Visirebene auf die horizontalen Meridiane *ab* und *cd*, also nur dann auf die horizontalen Trennungslinien, wenn diese mit den horizontalen Meridianen coincidiren; daher, streng genommen, auch nur in diesem Falle ein horizontaler Horopterdurchschnitt existirt, während bei allen sonstigen Augenstellungen von einer in der Visirebene verlaufenden Linie nur der fixirte Punkt einfach gesehen werden kann.

Denkt man sich die beiden Netzhäute in der Stellung, wie sie Fig. 163 zeigt, aufeinander gelegt, so decken sich von allen identischen Punkten nur die Mittelpunkte der Netzhäute; alle übrigen identischen Punkte sind gegeneinander verschoben um das Doppelte des Winkels, welchen die horizontalen Trennungslinien mit den horizontalen Meridianen einschliessen. Und so wird denn auch eine gerade Linie, die bei horizontaler Visirebene in geringem Abstande, etwa 8—10 Ctm. von der Nasenwurzel entfernt, vor den Augen liegt, bei Fixation eines von beiden Augen gleich weit entfernten Punktes derselben, doppelt erscheinen, und zwar in Gestalt eines liegenden Kreuzes mit sehr kleinen Winkeln rechts und links vom fixirten Punkte.

Hiernach werden alle Punkte im Raume doppelt gesehen, mit einziger Ausnahme aller derjenigen Punkte, deren Retinabilder auf die vertikalen Trennungslinien fallen, d. h. die Punkte in der früher betrachteten vertikalen Horopterlinie, die jedoch, wie wir wissen, in dem Falle, wo die unteren Enden der vertikalen Trennungslinien einander näher als ihre oberen stehen, eine gegen die Visirebene geneigte Lage hat, dergestalt, dass ihr unteres Ende den Augen näher liegt als ihr oberes (Fig. 160), während sie im umgekehrten Falle eine umgekehrte Lage hat, also ihr oberes Ende den Augen näher befindlich ist. Dagegen giebt es ausser der vertikalen Horopterlinie zugleich eine horizontale, mithin eine Horopterfläche, wenn die erstgenannte Linie senkrecht auf der Visirebene steht, was nach dem Obigen statt hat, falls die Sehaxen 45° unter den Horizont geneigt sind, und also die vertikalen Trennungslinien mit den vertikalen Meridianen und die horizontalen Trennungslinien mit den horizontalen Meridianen zusammenfallen.

249. Die Gestalt der horizontalen Horopterlinie ist nun nach Meissner und Baum eine gerade Linie. Nach einem von letzterem hervorgehobenen Versuche*) könnte man diesen horizontalen Horopterdurchschnitt allenfalls als einen Kreis betrachten, jedoch mit so grossem Halbmesser beschrieben, dass das ins Gesichtsfeld fallende Stück desselben von einer geraden, parallel zur Grundlinie verlaufenden Linie nur wenig verschieden sein wird. Meissner hat mehrere Versuche angegeben, die, obwohl auf indirectem Wege, doch am leichtesten über die Gestalt der horizon-

*) s. Meissner a. a. O. S. 56.

talen Horopterlinie Aufschluss geben. Seien z. B. auf einem Brettchen zwei Nadeln befestigt: die eine dem Auge näher als die andere seitwärts gelegene. Man fixire nun die eine, etwa entferntere, nachdem man sie in die vertikale Medianebene gebracht hat, wo dann die andere in verkehrten, nach oben divergirenden Doppelbildern erscheinen wird. Hierauf bewege man die letzterwähnte Nadel in gerader Richtung rückwärts, und man wird finden, dass ihre Doppelbilder sich allmälig nähern und verschwinden, wenn beide Nadeln in einer zur Grundlinie parallelen Geraden stehen. Eben so ist es, wenn man die nähere Nadel in die Medianebene bringt und sie fixirt, während man die fernere in gerader Richtung allmälig näher führt. Hat man im andauernden Fixiren eines Objects bei gleichzeitiger Beachtung der Doppelbilder eines anderen einmal eine gewisse Fertigkeit gewonnen; so gelingt dieser Versuch sehr leicht, auch dann schon, wenn man die beiden Nadeln frei mit den Händen fasst, die eine in einer gewissen (mässigen) Entfernung von den Augen fixirt und die andere etwas seitwärts gehalten auf die bezeichnete Weise bewegt.

Meissner führt unter anderen noch folgenden Versuch an, aus dem sich entnehmen lässt, dass die horizontale Horopterlinie, falls sie wirklich vorhanden, eine gerade der Grundlinie parallel laufende Linie ist. Eine gerade Linie, die gerade und horizontal vor die Augen gehalten wird, erscheint bei scharfer Fixation ihrer Mitte, wie wir wissen, in gekreuzten Doppelbildern, die beim allmäligen Abwärtsneigen der Sehaxen nach und nach sich übereinander schieben, so dass die Linie einfach, scharf und deutlich gesehen wird, wenn die Sehaxen 45° unter den Horizont geneigt sind. Die horizontale, der Grundlinie parallel laufende Gerade liegt dann ganz im Horopter, der somit in seinem horizontalen Durchschnitte eine gerade Linie darstellt. Da die gekreuzten Doppelbilder nur wenig auseinanderweichen, muss man die betreffende Linie den Augen ziemlich nahe bringen, jedoch nicht über die Accommodationsgrenze hinaus, weil sie sonst in störenden Zerstreuungsbildern erscheint.

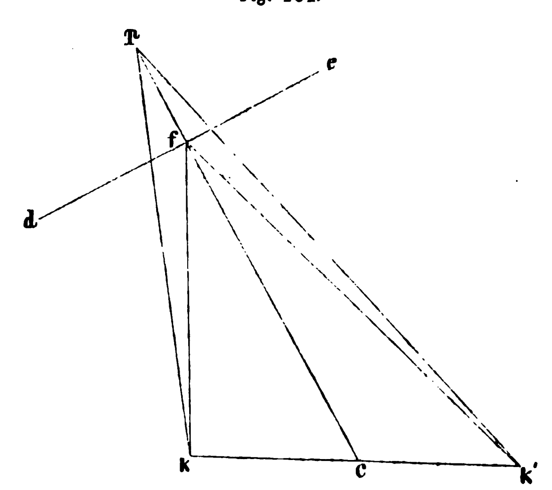
250. So wird demnach, weil sowohl der horizontale als auch der vertikale Horopterdurchschnitt als eine gerade Linie zu betrachten ist, der Horopter selbst eine Ebene darstellen, die jedoch nur dann vorhanden ist, und zwar als eine auf der Visirebene senkrecht stehende Ebene, wenn die Sehaxen 45° unter den Horizont geneigt sind. Dagegen giebt es, abgesehen von dem Paral-

lelismus der Sehaxen, bei allen sonstigen Neigungen und Convergenzwinkeln derselben, nur eine mittlere vertikale Horopterlinie, die mehr oder minder zur Visirebene geneigt in der vertikalen Medianebene durch den Fixationspunkt gerichtet ist, so dass sie bei allen Neigungen der Sehaxen oberhalb 45°, schräg von oben nach unten laufend, sich mit ihrem unteren Ende dem Beobachter nähert, während dasselbe bei allen Neigungen unterhalb 45° dem Beobachter ferner als das obere Ende liegt.

In Uebereinstimmung mit dem von Meissner gewonnenen Resultate, wonach einer Neigung der Sehaxen um 45° unter den Horizont vor der horizontalen Richtung derselben der Vorzug gebührt, steht das bekannte Factum, dass fast alle Geschäfte und Thätigkeiten, die vorzugsweise die Augen in Anspruch nehmen, wie z. B. Lesen und feine Handarbeiten aller Art, unwillkürlich und am angemessensten bei abwärts gerichtetem Blicke vollzogen werden, wie wir denn auch beim Ueberschauen einer grösseren Anzahl von Objecten den Augen gern die bezeichnete Richtung ertheilen *).

251. Endlich untersuchte Meissner noch die unsymmetrischen Augenstellungen, bei welchen der Fixationspunkt nicht, wie bei den symmetrischen, gleich weit von beiden Augen entfernt ist. In

Fig. 164.



*) s. Meissner a. a. O. S. 61 ff.

Figur 164 bezeichnet bei horizontaler Visirebene *f* den Fixationspunkt, *kk'* die Grundlinie und *cf* die zur Visirebene senkrechte Medianebene. Aus den Erscheinungen der Doppelbilder, welche ein im Punkte *p* zunächst senkrecht zur Visirebene stehender Stab darbietet, schloss nun Meissner*), dass es bei diesen Augenstellungen keinen senkrechten Horopterdurchschnitt giebt. Nur das Retinabild des Fixationspunktes, sonst aber keines anderen fällt auf identische Netzhautpunkte; daher auch nur jener Punkt im Sehfelde einfach erscheint. Dies gilt für alle unsymmetrische Augenstellungen, mit alleiniger Ausnahme derjenigen, bei welchen die Sehaxen parallel gerichtet oder 45° unter den Horizont geneigt sind. Indessen macht sich hierbei, namentlich bei geringem Abstande des Fixationspunktes von der Mitte der Grundlinie, der Unterschied der Entfernungen des seitlichen, etwa in *f* gelegenen, Objects von beiden Augen geltend, insofern hierdurch eine verschiedene Grösse der Netzhautbilder in beiden Augen bedingt wird. So wird die in *f* stehende Linie, streng genommen, nicht einfach gesehen, wenn das Retinabild im näher gelegenen Auge eine grössere Ausdehnung besitzt, als das im anderen, entfernteren Auge. Abgesehen hiervon ist die vertikale Horopterlinie bei den unsymmetrischen Augenstellungen und 45° abwärts gerichteten Sehaxen senkrecht zur Visirebene, und der horizontale Horopterdurchschnitt ebenfalls eine gerade Linie, die jedoch nicht, wie bei den symmetrischen Augenstellungen parallel mit der Grundlinie *kk'* ist, sondern, wie die Linie *de*, rechtwinklig zu der die Mitte der Grundlinie mit dem Fixationspunkte *f* verbindenden Linie *cf*.

In Rücksicht der Doppelbilder seitlich gelegener Objecte mache ich hier beiläufig minder Geübte darauf aufmerksam, dass sie das betreffende Object nicht allzuweit seitlich dem einen Auge nähern dürfen, weil es sonst sehr leicht geschehen kann, dass die Doppelbilder blos darum verschwinden, weil die Lichtstrahlen dieses Objects nicht mehr in das andere, entferntere Auge gelangen können. Ob dies der Fall ist oder nicht, erfährt man leicht, wenn man das dem Object nähere Auge schliesst; das Object wird dann, sofern es nicht mehr im Bereiche des anderen, offenen Auges liegt, unsichtbar sein.

252. Nach den angestellten Betrachtungen kann es, beim

*) a. a. O. S. 63 ff.

Gebrauche beider Augen, eigentlich niemals an Doppelbildern fehlen, da alle ausserhalb des jeweiligen Horopters gelegenen Objecte, die ihre Lichtstrahlen in beide Augen senden können, zu solchen Bildern Veranlassung geben. Doch ist man sich derselben unter gewöhnlichen Umständen nicht bewusst; es ist eine besondere Aufmerksamkeit und sogar Uebung bestimmter Art erforderlich, um sie leicht und distinct wahrnehmen zu können. Diese Nichtbeachtung der vorhandenen Doppelbilder kommt nun vor Allem daher, dass die Augen fast jederzeit in irgend einem Object sich schneiden, das dann, weil seine Retinabilder auf die physiologischen Mittelpunkte beider Netzhäute fällt und die Augen gerade für seine Entfernung adaptirt sind, vorzugsweise deutlich erscheint und somit auch am meisten ins Bewusstsein fällt, während die Objecte, die sich in Doppelbildern darbieten, meist auf die minder scharfsichtigen Seitentheile der Retina zur Darstellung kommen und wohl auch noch unter ungünstigen Accommodationsverhältnissen aufgenommen werden. Indem nun die Augenaxen beim gewöhnlichen Sehen bald hier, bald dorthin convergiren, kommt auf die bezeichnete Weise bald dieses, bald jenes Object zur deutlichen Wahrnehmung, während die nicht im Horopter gelegenen Objecte wohl unbestimmt wahrgenommen, aber wegen ihrer Undeutlichkeit nicht beachtet werden. Sodann kann es noch geschehen*), dass die Erregungszustände der differenten Netzhautstellen, welche den Doppelbildern eines Objects zu Grunde liegen, mit den Erregungszuständen der ihnen correspondirenden Stellen im anderen Auge, sofern auf die letzteren Bilder anderer Objecte fallen, Beziehungen auf denselben Ort im Sehfelde eingehen, wodurch die Doppelbilder jedenfalls noch undeutlicher werden müssen.

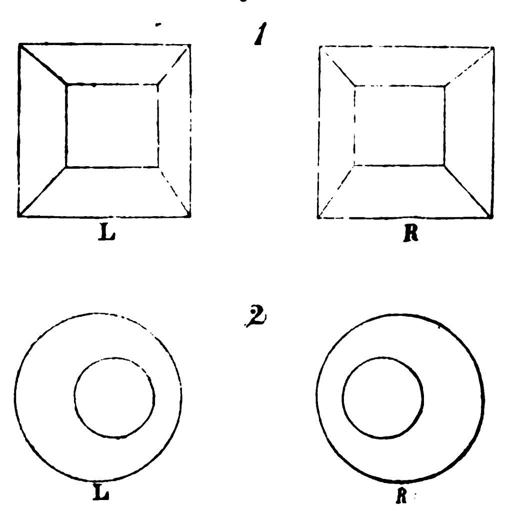
D. Stereoskopische Erscheinungen.

253. Ein Object, das man aus grosser Entfernung betrachtet, wir wollen sagen, aus einer so grossen, dass die auf dasselbe gerichteten Sehaxen nahezu untereinander parallel sind, bietet j e d e m Auge dieselbe perspectivische Ansicht dar; dasselbe zeigt sich gleich, mag man es nun mit dem einen oder mit dem anderen Auge allein betrachten. Anders verhält es sich dagegen, wenn ein

*) s. Volkmann in R. Wagner's Handw. der Physiol. Bd. III. Abthl. 1. Art. Sehen. S. 321.

Object beiden Augen so nahe steht, dass sich die Sehaxen derselben in ihm schneiden. Jedes Auge erhält dann eine verschiedene perspectivische Ansicht dieses Objects, wie man findet, wenn man bei unbewegtem Kopfe abwechselnd das eine und das andere Auge schliesst. Sieht man z. B. einen in der Nähe befindlichen Würfel, der mit einer seiner scharfen Kanten dem Gesichte zugekehrt ist, mit dem einen und dann mit dem anderen Auge allein an, so wird sich die Ansicht für das linke Auge merklich von dem für das rechte unterscheiden, und zwar im Allgemeinen um so mehr, je grösser der Convergenzwinkel beider Sehaxen ist. So gewährt eine abgekürzte Pyramide, deren kleinere Schnittfläche dem Gesichte gerade zugekehrt ist, für das linke Auge die perspectivische Projection *L*, für das rechte hingegen die Projection *R* (Fig. 165 N. 1);

Fig. 165.



und ein abgekürzter Kegel unter denselben Umständen die Projectionen *L* und *R* (Nr. 2). Blickt man von der grösseren Schnittfläche aus in das Innere eines hohlen Kegels oder einer hohlen Pyramide, so gilt umgekehrt für das linke Auge die mit *R* bezeichnete Ansicht und für das rechte die Projection *L*.

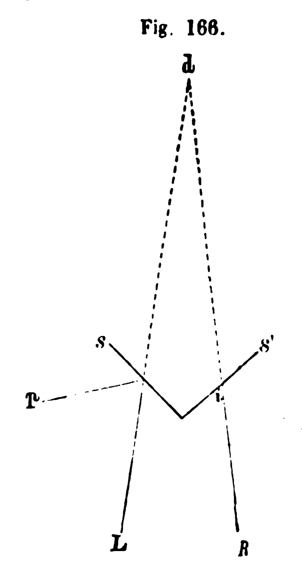
254. Der englische Physiker Wheatstone*) kam nun auf den Gedanken, dass zwei solche Ansichten, wie sie dem rechten

*) Philosophical Transact. for 1838; deutsch in Poggend. Ann. Ergänzungsband I. S. 9.

und linken Auge entsprechen, unter gewissen Umständen beiden Augen gleichzeitig dargeboten denselben Anblick eines Reliefs gewähren müssten, wie der Körper, von dem sie entnommen sind. Dieser Gedanke führte ihn dann weiter zur Construction einer einfachen Vorrichtung, Stereoskop genannt, durch welche die beiden verschiedenen Projectionen eines Körpers dergestalt zu einem Bilde vereinigt werden, dass dieses die Vorstellung der Gestalt des Körpers, als solchen, gewährt.

Man denke sich unter *s, s'* (Fig. 166) zwei kleine Planspiegel, die unter einem rechten Winkel zusammenstossen, und deren spiegelnde Flächen nach aussen gekehrt sind. Nun wird das rechte Auge in *R* den Objectpunkt *p'* mittelst des reflectirten Strahles *iR* hinter dem Spiegel in der Richtung *Rd* sehen, und das linke Auge *L* den Objectpunkt *p* in der Richtung *Ld*, so dass, wenn sich die beiden Richtungslinien *Rd* und *Ld* in *d* schneiden, hier die Bilder beider Objectpunkte zusammenfallen. In ähnlicher Weise werden die Reflexbilder zweier Projectionen eines Körpers, von denen sich das eine vor dem rechten, das andere vor dem linken Spiegel befindet, für den Beobachter zusammenfallen. Und wenn die reflectirten Bilder beider Projectionen den Ansichen entsprechen, wie sie beziehungsweise das rechte und linke Auge von einem Körper gewinnt, so werden sie zusammen den Eindruck des Körpers selbst machen.

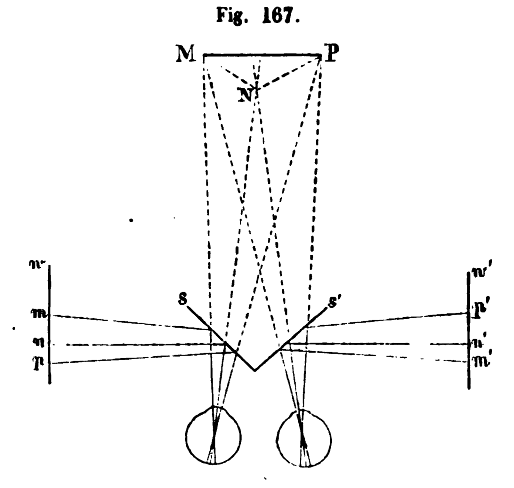
Fig. 166.



Derartig ist nun das Wheatston'sche Spiegelstereoskop eingerichtet. Die beiden rechtwinklig aneinander gefügten Planspiegel *s, s* (Fig. 167) sind an einem Rahmen befestigt und mit einem Brette überdeckt, welches zwei Ausschnitte enthält, damit man mit dem einen Auge in den Spiegel *s* und mit dem anderen in den Spiegel *s'* sehen kann. Die zueinander parallelen Seitenwände des Rahmens, *w* und *w'*, bilden mit den ihnen zugekehrten Spiegelflächen Winkel von 45°; und an diesen Seitenwänden befinden sich Leisten zur Aufnahme der auf steifem Papier gezeichneten

Projectionen eines Körpers, von denen die eine dem Spiegel *s*, die andere dem Spiegel *s'* zugekehrt ist. Da aber diese Projectionen

Fig. 167.



durch die Spiegelung eine Umkehrung erfahren, so ist die dem rechten Auge entsprechende links, bei *w*, und die dem linken Auge zugehörige rechts, bei *w'*, anzubringen. So wird man nun, wenn man z. B. die Projectionen einer abgestumpften Pyramide (Fig. 165, N. 1) auf die eben bezeichnete Weise einsetzt, beim Hineinsehen in die Spiegel das täuschende Relief einer abgestumpften Pyramide wahrnehmen. Dagegen sieht man eine vertiefte Pyramide, deren kleinere Schnittfläche uns abgewendet ist, wenn man die beiden Projectionen miteinander vertauscht, indem man die links eingelegte nach rechts, und umgekehrt die hier befindliche dorthin bringt. Bezeichnen *m*, *n*, *p* und *m'*, *n'*, *p'* die zugehörigen Projectionen eines Körpers, etwa eines prismatischen; so werden die betreffenden Punkte hinter den Spiegeln in den Richtungen der durch die Kreuzungspunkte beider Augen gehenden Linien gesehen.

Eine beträchtlich verschiedene Sehweite beider Augen kann vielleicht die Ursache sein, dass manche Personen die Erscheinung nicht gehörig wahrnehmen. In diesem Falle mag es vortheilhaft sein, wenn die Seitenwände des Rahmens in ungleiche Entfernung von den Spiegeln gebracht werden können, um auf diese Weise den Ort der Bilder der Sehweite beider Augen anzupassen.

255. Indessen hat man nicht einmal eine solche Vorrichtung nöthig, um aus den beiden gegebenen Projectionen das Relief her-

vorgehen zu lassen. Dazu ist nur erforderlich, dass man die beiden Projectionen, wie in Figur 165, S. 381, nebeneinander legt, die Verbindungslinie beider Augen in einem gewissen Abstande vom Papier in paralleler Richtung mit der Verbindungslinie der Mitten beider Projectionen hält, hierauf die letzteren durch Doppeltsehen in vier verwandelt und die beiden mittleren zum Decken bringt. Man erblickt dann, bei geeigneter Sehaxenconvergenz, das Relief in der Mitte zwischen seinen beiden Projectionen. Dieser Versuch gelingt bei Geübtheit im Doppeltsehen sehr leicht, und kann man dazu die in Fig. 165 dargestellten Projectionen sofort verwenden. Die Projectionen 2 gewähren dann den Anblick eines erhabenen Kegels, der sich vom Papier abhebt und dessen kleinere Schnittfläche dem Beobachter zugekehrt ist; die Projectionen 1 in derselben Weise eine erhabene Pyramide. Vertauscht man aber die zusammengehörigen Projectionen, falls jede auf einem besonderen Blatte verzeichnet ist, miteinander, indem man *L* an die Stelle von *R* und umgekehrt *R* an den Ort von *L* legt; so sieht man im Falle der Figur 165, N. 2 einen vertieften Kegel, dessen kleinere kreisförmige Schnittfläche hinter dem Papier liegt und vom Beobachter abgewendet ist.

Rollmann*) brachte folgende Methode in Vorschlag, um ohne besondere stereoskopische Vorrichtung das Relief zu erzeugen. Man stellt zwischen die beiden Zeichnungen eine vertikale Scheidewand, etwa ein Brett, dessen Höhe ungefähr gleich der Sehweite ist, und stützt sich mit Nase und Stirn auf dessen obere Kante. Hierauf legt man einen Finger in jeden äusseren Augenwinkel und zieht die Augen auseinander, bis die mittleren der hierdurch bewirkten Doppelbilder sich decken und als Relief erscheinen. Die meisten Personen werden wohl die Anwendung dieser Methode unangenehm empfinden. Man kann sich jedoch, wenn man Geübtheit im Doppeltsehen besitzt, immerhin einer solchen Scheidewand, z. B. ganz einfach der vertikal zwischen die beiden Zeichnungen gehaltenen Fingerhand, bedienen, um das Relief allein, nämlich ohne die beiden zur Seite liegenden Projectionen, wahrzunehmen, indem man in der oben bezeichneten Weise auf die betreffenden Projectionen herabsieht und sie durch eine geeignete Convergenz der Sehaxen zum Decken bringt.

---

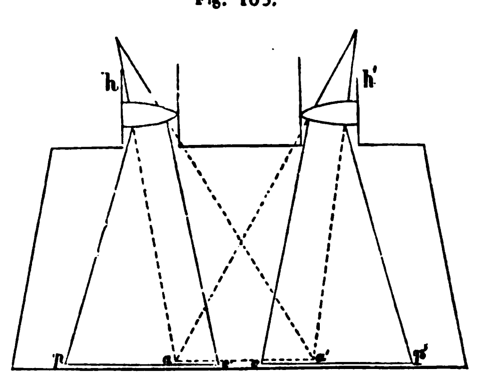
*) Poggend. Ann. Bd. LXXXIX. S. 350.

Die beiden Projectionen können aber zum Decken gebracht werden: sowohl wenn die Sehaxen hinter als wenn sie vor der Ebene sich kreuzen, auf welcher jene Bilder gezeichnet sind. Um die Kreuzung der Sehaxen hinter dieser Ebene zu bewirken, lassen sich zweckmässig zwei Röhren benutzen, die man dicht vor die Augen bringt und leicht so gegeneinander neigen kann, dass das Relief hervortritt. Die Kreuzung der Sehaxen vor der bezeichneten Ebene lässt sich, falls es aus freien Stücken nicht gelingen sollte, dadurch erleichtern, dass man die Spitze einer Nadel in einer gewissen Entfernung von den beiden Projectionen fixirt.

Beiläufig sei hier bemerkt, dass sich Cima*) den Eindruck eines Reliefs verschaffte, indem er eine 3 bis 4 Centimeter hohe Zeichnung eines Kopfes en face nach der Vertikalaxe der Nase in zwei Hälften schnitt, diese in lothrechter Stellung vor die Augen in geringerer Entfernung als der des deutlichen Sehens hielt, und dann durch geeignete Stellung der Augenaxen Doppelbilder in der Art bewirkte, dass die beiden mittleren Bilder, einander berührend, einen ganzen Kopf darstellten. Der letztere erschien dann als Relief; desto vollständiger, je länger die beiden Bilder betrachtet wurden.

256. Bequemer zum Gebrauche, namentlich für Ungeübte, sind nun allerdings die besonderen Vorrichtungen, die man Stereoskope nennt, von denen wir das Wheatston'sche Spiegelstereoskop bereits kennen gelernt haben. Die grösste Verbreitung hat

Fig. 168.



*) Il nuovo Cimento, VI. 185. — Cosmos par Moigno, XI. p. 353; — Poggend. Ann. Bd. CII. S. 319.

aber das Linsen-Stereoskop von Brewster *) gefunden. Um dieses herzustellen, wird eine Sammellinse von 6—7 Zoll Brennweite mitten durchgeschnitten und jede Hälfte so weit rund geschliffen, dass sie sich in eine Röhre fassen lässt. Man erhält dann (Fig. 168) zwei Röhren *h* und *h'*, die als Hülsen dienen und, wie bei einem doppelten Operngucker, drehbar sein können, um die beiden als Prismen wirkenden Linsenhälften so zu stellen, dass ihre brechenden Kanten gegen die Mittellinie des Apparates (nach der Nase) hin liegen. Diese Linsen bringen nun die beiden, dem linken und rechten Auge entsprechenden, Projectionen *pe*, *ep'* zum Decken, indem sie die von den letzteren kommenden Strahlen so brechen, dass sich beide Ansichten in *aa'* darzubieten scheinen.

Ausserdem gibt es noch eine Menge stereoskopischer Vorrichtungen **). So hat Dove ***) mehrere Prismenstereoskope angegeben, durch welche in verschiedener Weise mittelst der Brechung und Spiegelung der Lichtstrahlen in Prismen das Zusammenfallen zweier zusammengehöriger Projectionen eines Körpers und damit auch die Erscheinung des Reliefs bewirkt wird. Nach demselben lässt sich auch mit einer Zeichnung unter Anwendung eines Prisma die stereoskopische Erscheinung hervorbringen, wenn das körperliche Object, auf welches sich diese Erscheinung bezieht, von der durch seine Mitte gehenden und auf der Verbindungslinie beider Augen (des Beobachters) senkrecht stehenden Medianebene symmetrisch getheilt wird. Dann sind die beiden, dem rechten und linken Auge zugehörigen Projectionen des Körpers einfache Umkehrungen voneinander; die eine ist das Spiegelbild der anderen, indem sie für Oben und Unten identisch bleiben, in Bezug auf Rechts und Links sich aber unterscheiden, oder umgekehrt. Besitzt man demnach eine Projection für das linke Auge, die man mit diesem Auge direct sieht, während für das andere Auge ihr Spiegelbild an demselben Orte erscheint, so sind die Umstände dieselben wie da, wo man die Bilder zweier objectiv vorhandenen Projectionen desselben Körpers zum Decken bringt. Die Umkeh-

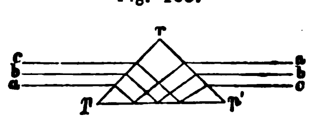
*) Report of the British Association for 1849. p. 6.

**) Ueber ein Stereoskop mit Prismen und Linsen, das grössere Bilder als gewöhnlich anzuwenden gestattet, s. Duboscq: Compt. rend. T. XLIV. p. 148, u. Dingler's polytech. Journ. Bd. CXLVII. S. 358.

***) Darstellung der Farbenlehre u. optische Studien, S. 196 ff.; Poggend. Ann. Bd. LXXX. S. 446, Bd. LXXXIII. S. 183.

rung der für das eine Auge gegebenen Zeichnung kann man nun durch ein gleichschenkliges Prisma, dessen Seitenflächen *pr* und *pr'* einen rechten Winkel einschliessen, leicht bewerkstelligen, wie sich im Hinblick auf den Gang der Lichtstrahlen in einem solchen Prisma leicht erkennen lässt. Die von den Punkten *a*, *b*, *c* kommenden parallelen Strahlen erfahren an der Seitenfläche *pr* eine Brechung, werden dann an der Hypothenusenfläche total reflectirt, und treten nach einer abermaligen Brechung an der Kathetenfläche *p'r* untereinander parallel heraus. Nun wird ein aufrechtstehender Gegenstand, durch dieses Prisma betrachtet, aufrecht an seiner Stelle bleiben, aber wie ein Spiegelbild seine rechte Seite mit seiner linken vertauschen, wenn das Prisma so gestellt ist, dass seine Hypothenusenfläche lothrecht steht und also sein rechter Winkel horizontal liegt. Daher wird denn auch die für das linke Auge gegebene Zeichnung mittelst des vor das rechte Auge gehaltenen Prisma als eine für dieses Auge entworfene Zeichnung erscheinen. Indem aber das Bild für das linke, freie Auge unverändert bleibt und beide Bilder leicht durch Drehung des Prisma um eine der auf der Brechungsebene senkrechten Kanten zum Decken gebracht werden können, tritt auch bald das vollendete Relief dem Beobachter entgegen *).

Fig. 169.



257. Als Objecte für das Stereoskop benutzt man jetzt sehr häufig Photographien**), die so aufgenommen sind, dass die eine die Projection eines körperlichen Gegenstandes für das rechte, die andere für das linke Auge darstellt. Besonders machen die stereoskopischen Landschaftsbilder einen guten Effect, die sogar eine viel deutlichere Vorstellung von den Formen der Landschaft geben, als die Betrachtung der wirklichen Landschaft gewährt, wenn man nicht etwa die einzelnen Objecte derselben schon durch Wahrnehmung von verschiedenen Standpunkten aus genauer kennt. Wir wissen, dass die Ansichten desselben körperlichen Gegenstandes für beide Augen um so mehr voneinander abweichen, je näher

*) Ueber einige andere stereoskopische Methoden s. Wilde: Poggend. Ann. Bd. LXXXV. S. 63, Rollmann: ebenda Bd. XC S. 186; und über stereoskopische Zeichnungen mit verschiebbaren Theilen zur Umwandlung des Eindrucks convexer Formen in den concaver, s. Halske: Poggend. Ann. Bd. C. S. 657.

**) s. Moser in Dove's Repertorium der Physik, 1844, Bd. V. S. 384.

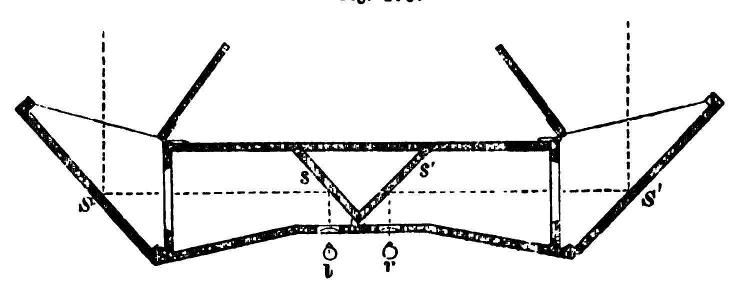
derselbe den Augen steht. Bei fernen Objecten sind dagegen die beiden Augen meist einander zu nahe, um merklich verschiedene Ansichten zu geben, und der Unterschied zwischen letzteren verschwindet ganz, wenn die Distanz beider Augen gegen die Entfernung eines Objects verschwindend klein ist. In diesem Falle ist aber auch die Beurtheilung der körperlichen Form und Entfernung, wenn nicht Schlagschatten und Luftperspective einige Aufschlüsse bieten, sehr unvollkommen. Davon überzeugt man sich, wie Helmholtz hervorgehoben, namentlich an fernen Gegenständen von unregelmässiger Form, z. B. an den die Aussicht begrenzenden Bergzügen. Die letzteren erscheinen stets wie eine uns kreisförmig umgebende, am Horizont gerade aufsteigende Wand; wir erkennen nichts von den Wölbungen, Einschnitten verschiedener hintereinander liegender Ketten der Berge, wenn uns nicht eben Schlagschatten, Luftsperspective oder eine genauere, schon früher erworbene Kenntniss ihrer Formen zu Hülfe kommen. Im Stereoskope kann man hingegen zwei photographische Ansichten einer Landschaft combiniren, die, wenn sie von zwei hinreichend weit auseinander liegenden Standpunkten aufgenommen sind, eine genügende Verschiedenheit darbieten, um eine deutliche Vorstellung von den körperlichen Verhältnissen der Landschaft zu gewähren. Beide Ansichten müssen übrigens gleichzeitig mittelst zweier möglichst genau übereinstimmender photographischer Apparate aufgenommen werden, damit ausser der Ungleichheit, welche durch die Verschiedenheit der Standpunkte bedingt ist, keine sonstigen Unterschiede, namentlich in Rücksicht des Schattens, sich geltend machen können.

258. Um nun auch beim directen Beschauen einer Landschaft einen Theil der Vorzüge zu gewinnen, welche die beiden photographischen Ansichten im gewöhnlichen Stereoskope bieten, hat Helmholtz*) ein einfaches Instrument construirt und dasselbe Telestereoskop genannt. Dieses zeigt dem Beschauer zwei Bilder der Landschaft, welche zwei Standpunkten entsprechen, deren Distanz die der beiden menschlichen Augen beträchtlich übertrifft, was nothwendig ist, wenn die Vorstellung der Körperlichkeit entfernter Objecte deutlich zu Tage treten soll.

*) Poggend. Ann. Bd. CI. S. 494 (Dingler's polytechn. Journ. Bd. CXLV. S. 2[illegible]8), Bd. CII. S. 167.

Das Instrument besteht im Wesentlichen aus vier Planspiegeln S, S' und s, s', die in einem gemeinsamen Kasten unter einem Winkel von 45° gegen die längste Kante desselben geneigt sind.

Fig. 170.



Die grossen Spiegel S und S', welche den fernen Objecten zugekehrt sind, reflectiren die von den letzteren kommenden Lichtstrahlen nach den kleinen Spiegeln s und s', von wo sie beziehungsweise in das linke und rechte Auge gelangen. Damit aber keine verzerrten Bilder entstehen, müssen die besten geschliffenen dicken Platten genommen werden, die man unter den käuflichen Spiegeln findet. Nun sieht der Beobachter in den kleinen Spiegeln die grossen, in den letzteren aber die Landschaft gespiegelt, und zwar mit dem rechten Auge so wie sie vom Spiegel S' rechts, und gleichzeitig mit dem linken Auge so wie sie vom Spiegel S links aus erscheint; daher hier beide perspectivische Ansichten eine grössere Verschiedenheit zeigen, als die beiden Augen des Beobachters, wegen ihrer viel geringeren Distanz, beim unmittelbaren Beschauen der Landschaft gewähren würden. Durch das Instrument wird die kaum 3 Zoll betragende Augendistanz des Beobachters, lr, bis zur Länge SS' künstlich vergrössert. Den gegenseitigen Abstand der grossen Spiegel nimmt man zu 4 Fuss oder etwa so gross wie die Breite eines Fensters, falls man vom Zimmer aus Beobachtungen anstellen will. Sonst zeigt das Instrument die körperlichen Formen der Objecte um so weiter in die Ferne hinaus, je beträchtlicher der Abstand der beiden grossen Spiegel ist. Und grössere Spiegel gewähren ein grösseres Gesichtsfeld.

Die Landschaftsbilder, die man mittelst dieses Instrumentes sieht, zeigen in der That, wie Helmholtz sich ausdrückt, eine überraschende Zierlichkeit und Eleganz. Ferne Gegenstände lösen sich von ihrem Hintergrunde ab, z. B. Berge, die eine ½ Meile entfernt



sind, vom Himmel; und namentlich Baumgruppen gewähren hier, wie auf den stereoskopischen Photographien, denselben überraschenden Anblick, indem sich die einzelnen Wipfel und in jedem Wipfel die einzelnen Zweige vollständig voneinander ablösen.

Zur deutlichen Wahrnehmung sehr entfernter Objecte ist es zweckmässig, in die den Augen entsprechenden Oeffnungen des Kastens (Fig. 170) sehr schwache Concavgläser von etwa 30 bis 40 Zoll Brennweite einzusetzen. Will man aber Vergrösserungen hervorbringen, so dient hierzu ein doppeltes Opernglas, das der Beobachter unmittelbar zwischen seine Augen und die kleinen Spiegel bringen kann. Um endlich nahe Objecte im Telestereoskop betrachten zu können, müssen die Spiegel um ihre senkrechten Axen drehbar sein, dergestalt, dass sich die Winkel zwischen der Spiegelfläche und der Längslinie des Kastens, unter Bewahrung des Parallelismus der einander zugewandten grossen und kleinen Spiegelflächen, etwas grösser als 45° machen lassen. Dann sieht man die Objecte sehr verkleinert, jedoch mit stark hervortretendem Relief.

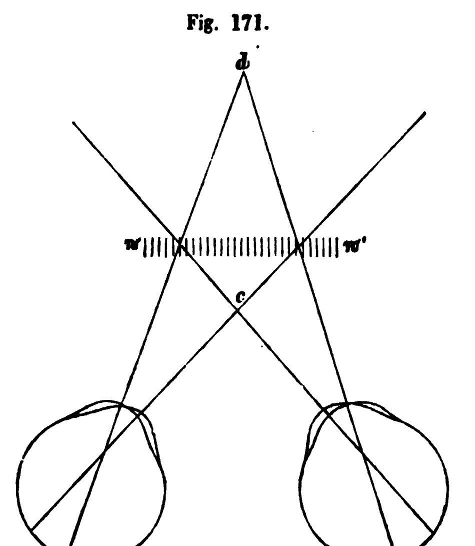
259. Wir wollen nun hier besonders hervorheben, was sich aus den bereits angestellten Betrachtungen über Stereoskopie allenfalls schon entnehmen lässt, dass nämlich der Convergenzwinkel der Sehaxen in irgend einem Zusammenhange steht mit unserem Urtheil über die Entfernung der Gesichtsobjecte. Je grösser dieser Winkel ist, desto näher scheint uns unter sonst gleichen Umständen das Object, worin sich die Sehaxen kreuzen, zu liegen. Um den directen Zusammenhang darzuthun, welcher bei Betrachtung eines Gegenstandes zwischen der Entfernung des letzteren von den Augen und dem Winkel der Sehaxen besteht, machten Brewster *) und H. Meyer **) auf einige Versuche aufmerksam, die sich auf die scheinbare Annäherung oder Fortrückung eines Gegenstandes beziehen, wenn man den Durchschnitts- oder Convergenzpunkt der Sehaxen vor oder hinter diesen Gegenstand fallen lässt. Man stelle sich einer vertikalen Wand gegenüber, welche eine und dieselbe Zeichnung (Tapetenmuster) in stets gleichen Grössen und Abständen enthält, und bringe durch stärkere Neigung der Sehaxen je zwei entsprechende Punkte dieser Zeichnung zum scheinbaren Zusammenfallen, was dann auch bei allen

*) Philosophical Magazine etc. Ser. III. Vol. XXX. p. 305.

**) im Archiv für physiologische Heilkunde, Bd. I.

übrigen geschehen wird, so dass man nun ein Bild der Wand wahrnimmt, das in den Convergenzpunkt der Sehaxen und daher näher gerückt ist. Auch erscheinen die Muster, deren Retinabilder an Grösse unverändert geblieben sind, in einem verjüngten Massstabe. Hat man dagegen eine durchsichtige, symmetrisch gezeichnete Wand, etwa eine Glastafel oder eine regelmässig durchbrochene, — etwa ein gleichförmiges Gitter oder den vertikal gestellten Sitz eines durchbrochenen Rohrstuhles, etc., — so wird man die Felder derselben, wenn man den Convergenzpunkt der Sehaxen hinter dieselbe verlegt, in grösserer Entfernung und zugleich vergrössert zu sehen glauben. In Figur 171 bezeich-

Fig. 171.



net *ww'* die Wand mit regelmässig wiederkehrenden Mustern. Bei Fixation des Punktes *d* rückt das Bild der Wand in die Entfernung dieses Punktes, während dieselbe, wenn sich die Sehaxen in *c* kreuzen, hier gesehen wird. Die regelmässig wiederkehrenden Muster sind aber bei diesen Versuchen darum von Bedeutung, weil dieselben durch das Zusammenfallen zusammengehöriger Doppelbilder (§. 255) leicht ein stereoskopisches Bild der Wand entstehen lassen.

Die soeben mitgetheilten Versuche zeigen noch, dass der Convergenzwinkel der Sehaxen auch mit der Grössenvorstellung

eines Objects, das wir mit beiden Augen sehen, in einem gewissen Zusammenhange stehen muss. Das Factische hierbei lässt sich zunächst in dem Satze aussprechen, dass die Grösse des sichtbaren Bildes unter sonst gleichen Umständen wächst, wenn der Convergenzwinkel abnimmt, und vermindert wird, wenn der Convergenzwinkel zunimmt. Zur Bestätigung dieses Satzes kann man auch, wie H. Meyer*) gezeigt, das Wheatston'sche Spiegelstereoskop benutzen. Schiebt man nämlich die beiden zusammengehörigen Projectionen eines Objects, ohne sonst ihre gegenseitige Lage zu verändern, längs den Wänden *w*, *w'* dieses Apparates (Fig. 167 S. 383) dem Beobachter um einen gewissen Betrag gleichmässig näher, so rückt auch der Convergenzpunkt *N* der Sehaxen näher, und der Winkel, den beide einschliessen, wird grösser. Das Relief gewahrt man aber dann merklich kleiner, während es umgekehrt merklich grösser erscheint, wenn man die beiden Projectionen um gleich viel vom Beobachter hinwegrückt, wodurch auch der Convergenzpunkt der Sehaxen weiter entfernt und der Winkel zwischen den letzteren kleiner wird.

260. Im Hinblick auf die eben besprochene Beziehung zwischen der Sehaxenconvergenz und unserer Vorstellung von der Entfernung der Gesichtsobjecte sei hier über das Zustandekommen des Reliefs einer Ansicht gedacht, die namentlich durch Brücke**), Tourtual***), Brewster†) und Prevost††) zur Geltung gekommen ist. Nach dieser Ansicht wird die Reliefvorstellung wie beim Binocularsehen eines wirklichen Körpers so auch bei der Combination der beiden, dem rechten und linken Auge entsprechenden, Projectionen desselben durch veränderte Convergenz der Sehaxen gewonnen. Nehmen wir mit Tourtual als Beispiel die beiden Projectionen eines abgestumpften, mit der kleinen Schnittfläche dem Beobachter zugekehrten Kegels (S. 381, Fig. 165). Benutzt man nun das Wheatston'sche Stereoskop, so ist, wegen Umkehrung der Projectionen durch Reflex (von Seiten der Spiegel), die dem linken

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXV. S. 198.

**) Müller's Archiv, 1841. S. 459.

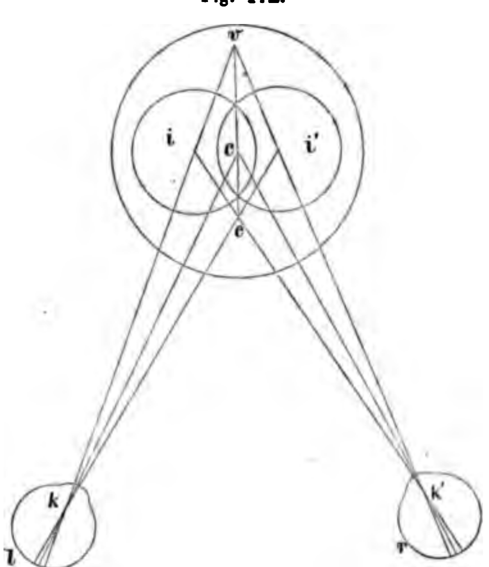
***) Die Dimensionen der Tiefe im freien Sehen etc. Münster 1842.

†) Edinb. Transactions. 1843. p. 349.

††) Biblioth. universelle. Novembre 1843; — Poggend. Ann. Bd. LXII. S. 548.

Auge entsprechende Projection *L* an der rechten Wand des Apparates, die andere *R* aber links zu befestigen. Dann werden, wenn die Spiegelbilder der grösseren Kreise sich decken, die der kleineren sich schneiden (Fig. 172), in ähnlicher Weise, wie man es wahrnimmt, wenn man das Relief mit freien Augen durch

Fig. 172.



Doppeltsehen der beiden nebeneinander liegenden Projectionen zu erzeugen sucht. In Bezug auf das Spiegelstereoskop wird der innere, der Projection *L* zugehörige Kreis *i* vom rechten Auge *r*, der innere, der Projection *R* angehörige, Kreis *i'* aber vom linken Auge *l* gesehen. Die beiden combinirten Projectionen würden sich nun, wenn man den gemeinsamen Mittelpunkt *c* der sich deckenden grösseren Kreise fixirt, so wie in Fig. 172 darstellen, wo die beiden Sehaxen, deren Ebene man sich senkrecht zur Papierfläche denken mag, sich in *c* schneiden. Mit dem Bestreben aber, die kleineren Kreise zur Coincidenz zu bringen, gewinnen die Sehaxen die Stellung *k e*, *k' e*; der Convergenzpunkt rückt dem Beobachter näher von *c* nach *e*, und das Bild der jetzt coincidirenden kleineren Kreise erscheint in *e* vor dem Bild des gemeinsamen äusseren Kreises, während man den ringförmigen Raum zwischen beiden Kreisumfängen als die geneigte Schnittfläche des Kegels wahrnimmt.



Und so vollendet sich das Relief in wesentlich gleicher Weise, wie bei dem Beschauen eines wirklichen Kegels, dessen kleinere Schnittfläche uns gerade zugekehrt ist, indem die Sehaxenconvergenz beim abwechselnden Betrachten der grösseren und kleineren kreisförmigen Basis dieselbe Veränderung erfährt: die Sehaxen schneiden sich abwechselnd in den näheren und entfernteren Theilen des gegebenen Körpers, und bilden bei jenen einen grösseren Convergenzwinkel als bei diesen, wie auch bei Erzeugung des Reliefs aus den beiden obigen Projectionen die Sehaxenconvergenz beständig wächst, wenn bei zunehmender Coincidenz der inneren Kreise der Convergenzpunkt dem Beobachter näher rückt. Die einheitliche Erscheinung des Ganzen resultirt aber aus der Vereinigung der im raschen Nacheinander gewonnenen Eindrücke. Decken sich beide Projectionen im Stereoskop, so fallen doch nicht zugleich alle zueinander gehörigen Punkte derselben auf correspondirende Punkte beider Netzhäute, sondern succesiv in Folge veränderter Sehaxenconvergenz werden die Bilder zusammengehöriger Punkte beider Zeichnungen auf correspondirende Netzhautpunkte versetzt. Und dies gilt ebenso für das binoculare Sehen eines Körpers, dessen sämmtliche Punkte auch nicht sofort auf correspondirende Punkte beider Netzhäute zu liegen kommen. Die Einheit der Erscheinung wird auch hier vollendet durch successive Versetzung der zusammengehörigen Theilbilder in correspondirende Netzhautpunkte.

Bringt man die Projection L (Fig, 165) an die linke und die andere R an die rechte Wand des Spiegelstereoskopes, so weichen die inneren Kreise beider Projectionen, verglichen mit dem obigen Falle, im entgegengesetzten Sinne auseinander, d. h. der Kreis i wird vom Auge l und der andere i' vom Auge x gesehen. In diesem Falle wird die Coincidenz der inneren Kreise dadurch bewirkt, dass der Convergenzpunkt der Sehaxen von c nach v rückt (Fig. 172). Das Bild der sich deckenden kleineren Kreise erscheint dann hinter der Ebene des äusseren Kreises, und man hat nun den Anblick eines vertieften Kegels.

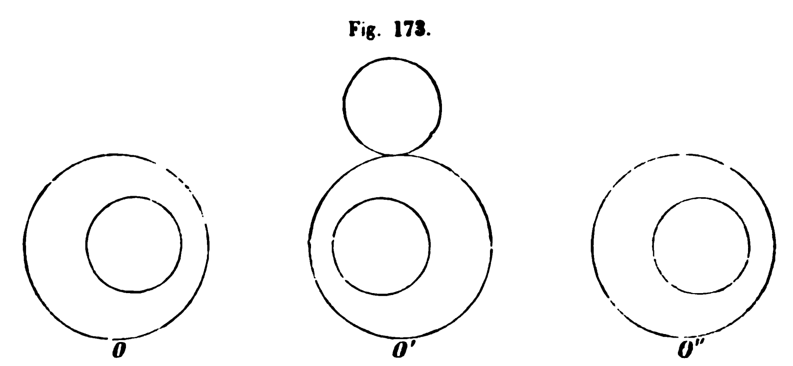
261. Sobald nun die inneren Kreise bei der Erscheinung des Reliefs (des abgestumpften Kegels) vollständig coincidiren, treten die beiden grösseren Kreise ein wenig auseinander, so wie auch umgekehrt die kleineren ein wenig auseinander weichen, wenn die grösseren sich vollständig decken. Diese Erscheinung kann

nicht ausbleiben, da, wenn man einen Punkt fixirt, bekanntlich ein näher oder entfernter gelegener doppelt erscheint, ganz entsprechend unseren früheren Betrachtungen über die correspondirenden und differenten Netzhautstellen. Auch beim Betrachten wirklich körperlicher Objecte fehlt diese Erscheinung nicht, obwohl sie hier der Wahrnehmung meist entgeht; sie wird aber sehr merklich, wenn man die Umrisse eines Körpers durch Drähte darstellt. Man stelle z. B. das Drahtskelet eines Würfels nahe vor die Augen, dergestalt, dass die Verbindungslinie zweier gegenüberliegender Ecke dem Angesichte gerade zugewandt ist. Fixirt man nun die eine Ecke, so wird die andere doppelt erscheinen, und umgekehrt. Bei fortdauernder Fixation eines dieser Punkte wird aber das Relief vernichtet und der Würfel als ein Sechseck mit Radien gesehen, woraus Tourtual*) schliesst, dass sowohl beim Sehen wirklicher Körper als bei dem ihrer Projectionen die veränderte Sehaxenconvergenz subjectiv bedingendes Moment für die Dimension der Tiefe ist.

Vergleicht man aber das Bild der coincidirenden innern Kreise seiner Grösse nach mit dem innern Kreise der Projectionen, so wird man hier eine Thatsache bestätigt finden, die wir schon oben (§. 259) bei Gelegenheit des Zusammenhanges zwischen dem Convergenzwinkel und der Vorstellung von der Grösse eines Objects hervorgehoben haben. Das Bild der coincidirenden kleineren Kreise erscheint nämlich im Falle eines erhabenen Kegels, wo also dasselbe dem Beobachter näher liegt, merklich kleiner als der innere Kreis der beiden Projectionen, dagegen merklich grösser als dieser, wenn es, wie bei der Erscheinung des vertieften Kegels, vom Beobachter entfernter liegt. Sehr bequem lässt sich diese Vergleichung anstellen, wenn man an den grösseren Kreis beider Projectionen einen Berührungskreis, dessen Durchmesser dem des inneren Kreises gleich ist, legt und nun das Relief erzeugt, wo sich dann neben dem grösseren Grundkreise des Reliefs der berührende kleinere Kreis zum Vergleich mit dem Bilde der coincidirenden innern Kreise darbietet. Will man zu diesem Behufe das Relief durch Doppeltsehen erzeugen, so dienen für den Fall des erhabenen Kegels die Projectionen *O* und

*) Die Dimensionen der Tiefe etc. S. 85 f.

Fig. 173.

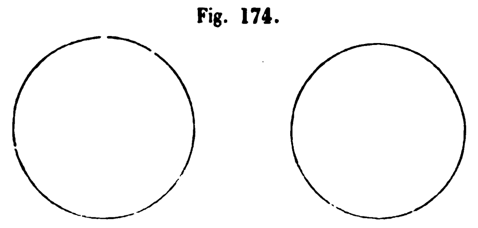


O', und für den Fall des vertieften Kegels die beiden Projectionen O' und O'', so wie sie hier vorliegen.

262. Es seien nun hier noch einige stereoskopische Erscheinungen hervorgehoben, die in einer besonderen Beziehung zu der früher erörterten Lehre von den correspondirenden (identischen) und differenten Punkten beider Netzhäute stehen.

Zwei einfache geometrische Figuren, von derselben Art und Grösse, z. B. zwei Kreise von gleichem Durchmesser, die auf bekannte Weise in ein Stereoskop, etwa in das Wheatston'sche Spiegelstereoskop eingesetzt sind, decken sich vollständig; sie fallen in beiden Augen auf identische Netzhautstellen, und man sieht nur einen Kreis. Allein auch dann, wenn die Durchmesser beider stereoskopisch combinirten Kreise merklich, jedoch nur wenig, differiren, erscheint bei stereoskopischer Combination nur ein Kreis, der im Vergleich zu jenen von mittlerer Grösse ist. Man überzeugt sich davon, bei Geübtheit im Doppeltsehen, sofort, wenn man die beiden Kreise, wie hier in Fig. 174 nebeneinanderlegt,

Fig. 174.



durch geeignete Convergenz der Sehaxen aus jedem ein Doppelbild erzeugt und die beiden mittleren Bilder zum Decken zu bringen sucht, wo man dann im Falle des Gelingens die drei Kreise nebeneinander sieht, von denen der mittlere (stereoskopisch) mit bei-

den Augen gesehen wird. Dieser Kreis erscheint nun etwas kleiner als der dem einen Auge zugehörige grössere, und ein wenig grösser als der mit dem anderen Auge gesehene kleinere Kreis. Hier bringen also zwei Retinabilder von ungleicher Grösse, die nicht auf correspondirenden Punkten beider Netzhäute liegen, den Eindruck einer einfachen' Figur hervor. — Dieser Versuch lässt sich auf verschiedene Weise variiren. So werden auch die beiden Projectionen einer geraden Linie bei stereoskopischer Combination einfach gesehen, wenn ihre Retinabilder auf differente Netzhautstellen fallen, unter der Voraussetzung, dass diese nur wenig von correspondirenden entfernt liegen; und unter denselben Umständen lassen sich auch zwei parallele Linien mit zwei anderen parallelen von etwas grösserem oder geringerem Abstande zum Decken bringen, so dass nur zwei Parallellinien erscheinen.

263. Um diese Beobachtungen, die Wheatstone zum Theil der Lehre von den correspondirenden und differenten Netzhautpunkten, in Hinsicht auf das Einfachsehen mit beiden Augen, entgegenstellte, mit derselben in Einklang zu bringen, dachte Brücke*) an einen verschiedenen Brechungszustand beider Augen, in der Art, dass das eine Auge, welches den grösseren der Kreise sehe, sein Brechungsvermögen wie beim Nähersehen soweit erhöhe, bis sein Netzhautbild um die Hälfte des Unterschiedes beider Netzhautbilder kleiner werde, das andere aber durch Verringerung seines Brechungsvermögens das seinige um eben so viel vergrössere, so dass dadurch die Netzhautbilder beider Kreise auf correspondirende Netzhautstellen gerückt würden. Indessen zeigte Tourtual**) die Unzulänglichkeit dieser Erklärung. Dagegen hat neuerdings Giraud-Teulon***) die Ansicht aufgestellt, dass durch Formveränderungen der Netzhaut selbst die Bilder der Projectionen auf correspondirende Punkte gebracht werden möchten; allein auch daran ist wohl nicht zu denken. Nach Tourtual †) geschieht das Einfachsehen der ungleichen Kreise in der Hauptsache auf dieselbe Art und Weise, wie nach ihm das Relief aus den beiden Augen entsprechenden Projectionen eines körperlichen Objects resultirt, nämlich

*) Müller's Archiv. 1841. S. 473.
**) Die Dimensionen der Tiefe etc. S. 88 ff.
***) Comptes rendus. T. XLV. S. 566.
†) a. a. O. S. 91 f.

durch umschreibende Bewegung einer identificirenden Sehaxenconvergenz. Derselbe bringt zwei kleinere Kreise, von resp. 7''' und 9''' Durchmesser, in das Stereoskop, welche getrennt und concentrisch gesehen werden, und richtet nun den Blick nach der einen Seite der Figur, wo dann an dieser eine Berührung der Kreislinie erfolgt, während sie sich an der entgegengesetzten Seite voneinander entfernen. Ein abwechselndes Sehen nach der rechten und linken Seite bewirkt ein Ballotement des kleinen Kreises im grossen. Hier findet also eine identificirende Axenbewegung in der Weise statt, dass jedesmal zwei nebeneinanderliegende Punkte der Kreise in die Sehaxen fallen und diese jenseits der Fläche sich schneiden. Eine umschreibende Bewegung des Blickes leitet den kleinen Kreis innerhalb des grossen an dessen Umfange herum, mit Ausnahme des oberen und unteren Segmentes des letzteren, an welchem die Kreise getrennt bleiben. Nimmt man aber den Durchmesser des grossen Kreises um etwa 1 Linie kürzer, so gelingt diese Herumführung in der Contiguität vollständig. Von der Richtigkeit dieser Beobachtungen überzeugt man sich, bei Geübtheit im Doppeltsehen, auch leicht ohne Stereoskop, wenn man beide Kreise (Fig. 174) nebeneinander legt, durch Doppeltsehen vier Bilder herstellt, und die beiden mittleren durch eine umschreibende Bewegung des Blickes zur Coincidenz zu bringen sucht.

Tourtual*) stellte noch folgenden hierauf bezüglichen Versuch an. Die Seitentheile zweier grösserer Kreise, die bei einer Durchmesserdifferenz von 1¾''' im Stereoskop einfach erscheinen, werden durch aufgeklebte Papierstreifen verdeckt und hierauf die frei gebliebenen oberen und unteren Segmente in den Spiegeln des Wheatstone'schen Instruments betrachtet. Man sieht dann jedes Segment bei Fixation des Mittelpunktes in zwei übereinander liegenden Bogen, woraus Tourtual entnimmt, dass beim Einfachsehen der ganzen Figur die Einbildungskraft ins Spiel trete. Fixirt man ferner die unteren oder oberen Kreisbogen scharf, mit dem Bemühen sie einfach zu sehen, so erfolgt unter dem Gefühle der Anstrengung die Vereinigung, während die anderen sich weiter zu trennen scheinen. Bei allen diesen Versuchen müssen aber die Centra der Reflexbilder genau zusammenfallen. Dieser Effect, der, wie Tourtual bemerkt, nur dadurch erklärbar ist, dass die Sehaxen

*) a. a. O. S. 92 f.

ein wenig aus ihrer Ebene herausweichen, macht es nach demselben mehr als wahrscheinlich, dass das Einfachsehen der ungleichen Kreise durch umschreibende Bewegung einer identificirenden Axenconvergenz zu Stande kommt. — Solchergestalt findet Tourtual in der betrachteten Erscheinung des Einfachsehens ungleicher Figuren keine Widerlegung der Lehre von den identischen und differenten Netzhautstellen.

Prevost*) reflectirt bei der Erklärung dieser Erscheinung noch auf den Umstand, dass man die Grösse eines Gegenstandes aus der Bewegung beurtheilt, welche die Muskeln der Augen diesen Organen ertheilen müssen, um alle Punkte des Gegenstandes zu fixiren. Nun sind die Bewegungen, welche die Augen ausführen müssen, um successiv alle Punkte beider Kreise zur Coincidenz zu bringen, einerseits geringer als die, welche zur Bestimmung der Grösse des grösseren Kreises erfordert werden, und andrerseits beträchtlicher als die, welche zur Bestimmung der Grösse des kleineren Kreises nöthig sind; daher man dem einzigen Kreise, den man im Stereoskope sieht, eine, gegen die beiden ursprünglichen Kreise, intermediäre Grösse zuschreiben müsse.

264. Ein anderer Versuch, welchen Wheatstone der in Rede stehenden Theorie von den identischen und differenten Netzhautpunkten entgegenstellte, ist folgender. Zwei Linien, eine vertikale *r* und eine andere etwas geneigte *l* gewähren im Stereoskope den Anblick einer einfachen Linie, deren Enden in verschiedener Entfernung von den Augen erscheinen, was man, bei Geübtheit im Doppeltsehen, auch sofort mittelst der hier stehenden Figur wahrnehmen kann, wenn man nämlich jede Linie in Doppelbildern erscheinen lässt und die beiden mittleren Bilder zum Decken bringt. Ich sehe dann eine Linie, deren unteres Ende meinem Angesichte sehr merklich näher liegt, als ihr oberes Ende. Nun ist durch die Mitte der geneigten Linie *l* noch eine schwächere, vertikale gezogen, die der Linie *r* für das rechte Auge an Länge und Stellung genau entspricht. Bei stereoskopischer Combination, sei es auf die eine oder andere Weise, erscheinen die beiden starken,

Fig. 175.

l r

*) Poggend. Ann. Bd. LXII. S. 565.

ungleich geneigten Linien zusammen einfach, so wie zuvor angegeben, während man die schwächere Vertikallinie an einem anderen Orte, d. h. nicht mit der anderen starken Vertikallinie vereinigt sieht, wie es doch, meint Wheatstone, nach der Theorie der identischen Netzhautpunkte geschehen sollte. Dagegen sieht Tourtual *) auch in dieser Erscheinung nichts für die eben genannte Lehre Bedrohliches. Nach ihm werden die zwei starken, in Qualität sich gleichen Linien in Gedanken als Einheit aufgefasst und durch die Sehaxenbewegung in successive Deckung gebracht, woraus eine doppelt geneigte Linie resultirt, während die schwache Linie in der senkrechten Stellung bleibt. Weil aber diese Operation mit wachsendem Kreuzungswinkel der Linien immer schwieriger wird, so hat die scheinbare Trennung ursprünglich identischer Bilder (nämlich hier der beiden Vertikallinien) auch in dem Grade dieses Winkels ihre Grenze, über welche hinaus sich die Einheit wieder herstellt und das Relief verschwindet. Als Beweis für die Richtigkeit dieser Erklärung hebt Tourtual hervor, dass bei scharfem Fixiren eines Punktes der schwachen Linie diese mit der anderen Vertikallinie sich vereinigt, die schräge Linie dagegen abweichend gesehen wird, und das Relief des Ganzen sich verflacht.

265. Sollten inzwischen die (in §. 262 ff.) besprochenen Erscheinungen, wie wir einmal annehmen wollen, sich der Lehre von den correspondirenden Netzhautpunkten nicht subsumiren lassen, so würde damit die letztere doch nicht schlechthin aufgehoben sein, da sie zum Theil nur ein einfacher Ausdruck bestimmter Thatsachen ist. Man würde immerhin noch anerkennen müssen, dass Lichteindrücke auf gewisse correspondirende Netzhautstellen ausgeübt zur Einheit der Ortsempfindung führen, dagegen solche auf differente Netzhautstellen bei weitem in der Mehrzahl der Fälle zu differenten Ortsempfindungen. Und differente Retinapunkte, deren Affectionen eine einfache Empfindung gewähren sollen, dürfen eben nicht weit von correspondirenden entfernt liegen. Hier könnte man wohl geneigt sein, sich das Verhältniss in der Weise wie Panum**) vorzustellen, der darzuthun suchte, dass jedem Punkte der einen Netzhaut nicht etwa nur ein Punkt der anderen, sondern vielmehr ein ganzer Empfindungskreis entspreche, daher denn auch alle

*) a. a. O. S. 84 f.

**) Physiologische Untersuchungen S. 62; 92.

Eindrücke, die auf irgend welche Punkte zweier correspondirender Empfindungskreise beider Netzhäute fallen, auf anatomisch-physiologischem Wege zur Einheit der Empfindung führen müssten. Und in der That hat man wohl keine Veranlassung, die correspondirenden Netzhautstellen im mathematischen Sinne als punktuell aufzufassen. Nimmt man die Stäbchen- und Zapfenschicht als lichtpercipirendes Organ an (§. 137 ff., 220 f., 223), so repräsentirt am gelben Fleck wenigstens jeder Zapfen einen Empfindungskreis, während auf den seitlichen Retinatheilen die Anzahl der selbstständigen Empfindungskreise merklich geringer oder, was in gewisser Beziehung dasselbe ist, der Durchmesser eines Empfindungskreises merklich grösser als dort sein wird, weil hier, auf den Seitentheilen, die Zapfen spärlicher und umringt von Stäbchen vorkommen, die zusammen nur mit einer Nervenfaser communiciren.

Indessen harmoniren mit der Art und Weise, wie Panum die Empfindungskreise der Retina auffasst, eben nicht die Wahrnehmungen Volkmann's*), nach welchen es in Folge abgeänderter, durch Erziehung und Gewöhnung des Auges mitbedingter, Aufmerksamkeitsverhältnisse geschehen kann, dass das, was einmal zur Einheit verschmilzt, ein anderesmal doppelt und getrennt erscheint.

Wir verlassen hier die stereoskopischen Erscheinungen, auf deren Theorie wir im psychologischen Theile dieses Werkes wieder zurückkommen werden.

E. Gesichtserscheinungen in Bezug auf den blinden Fleck der Retina.

266. Schon Mariotte machte die Wahrnehmung, dass es auf der Netzhaut des Auges einen blinden Fleck gebe, d. h. ein Stelle, die für die Lichtstrahlen unempfänglich sei. Dieser blinde Fleck ist die Eintrittsstelle des Sehnerven (S. 220), was in neuerer Zeit durch Beobachtungen mit dem Augenspiegel zur Evidenz gebracht ist. Wird nämlich die bezeichnete Stelle mit Hülfe dieses Instrumentes beleuchtet, so sind hier fast alle ins Auge dringenden Fasern des nerv. opticus dem Lichte ausgesetzt; gleichwohl sieht die Person, deren Auge also erleuchtet ist, keine Lichterfüllung in diesem, wie es sein müsste, wenn die in der Eintrittsstelle des Seh-

*) Gräfe's Archiv für Ophthalmologie. 1858.

nerven vom Lichte getroffenen Fasern zu einer Lichtempfindung Anlass geben könnten (vergl. S. 223). Sonach liegt es nahe, die Fasern des nerv. opticus im Sehacte nur als Leiter eines Reizzustandes zu betrachten, der ihnen von Seiten anderer Retinaelemente (Zapfen und Stäbchen), wenn diese durch äusseres Licht oder sonstwie afficirt werden, mitgetheilt wird.

Von der Existenz eines blinden Fleckes in jedem Auge überzeugt man sich gewöhnlich in folgender Weise. Man bringt auf ein weisses Papier zwei schwarze oder auf ein schwarzes Papier zwei weisse Punkte, in einem Abstande von ungefähr zwei Zoll nebeneinander; und sieht dann, indem man das linke Auge schliesst, mit dem rechten Auge auf den links liegenden Punkt, oder bei Schliessung des rechten Auges mit dem linken auf den rechts liegenden Punkt, aus einer Entfernung herab, die etwa fünfmal grösser als der Abstand beider Punkte ist. Alsdann verschwindet der andere Punkt, indem sein Bild gerade auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt.

Man kann auch längs einer Linie eine Reihe von Punkten in einem gewissen Abstande zeichnen und einen der äusseren mit einem Auge, bei Verschluss des anderen, fest fixiren, wo dann einige Punkte, deren Bilder auf den blinden Fleck fallen, verschwinden werden. Indessen geschieht dies bei einem bestimmten gegenseitigen Abstande der Punkte nur für eine ganz bestimmte Entfernung des Auges vom fixirten Punkte. Mit Zu- oder Abnahme der letzteren muss auch der Abstand der Punkte ein anderer werden, damit in der bezeichneten Weise einige der Wahrnehmung entgehen können, wie dies sofort aus Fig. 176 erhellt. Auch erkennt

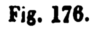
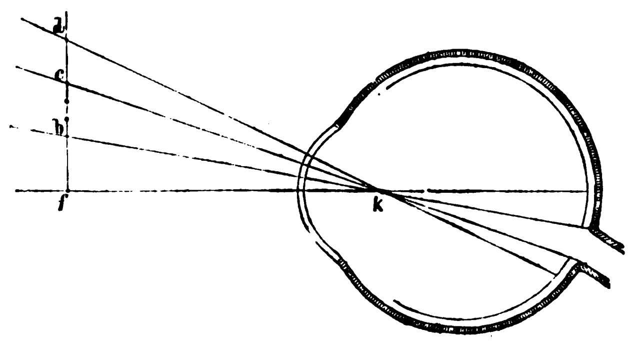


Fig. 176.



man leicht, dass, wenn die Entfernung des fixirten Punktes *f* vom Auge und der Abstand der Punkte *f*, *b*, *c*, *d* voneinander gegeben sind, sowohl die Lage als auch die Grösse des blinden Fleckes ohne Schwierigkeit zu berechnen ist, wobei man die Dimensionen des schematischen Auges zu Grunde legen kann. In der hier stehenden Figur bezeichnet *kf* die Sehaxe, *k* den Kreuzungspunkt der Richtungslinien, und *bc* die Distanz, deren Bild auf den blinden Fleck fällt. — Ausgeführte Messungen am lebenden Auge haben dargethan, dass die mittlere Grösse des blinden Fleckes mit der an todten Augen bestimmten mittleren Grösse des Sehnervendurchschnittes an der Eintrittsstelle übereinkommt. Krause giebt diesen Durchschnitt da, wo der Sehnerv durch die Chorioidea tritt, zu 0,066″ an.

Nach einer Ausmessung, die Listing am blinden Flecke seiner eigenen Augen vornahm und E. H. Weber*) mittheilte, nimmt der Durchmesser dieses Fleckes 5°55′9 ein und ist also $1^{mm},55$ = 0, 6867 Par. Lin. breit. Die Entfernung der Mitte desselben von der Augenaxe berechnete Listing, indem er den Abstand des Knotenpunktes von der Retina = 15^{mm} annahm, zu $4^{mm},08$ oder 1,808 Par. Lin. In horizontaler Richtung fasste der blinde Fleck nach Listing im Mittel aus den Messungen seiner zwei Augen 5 Grad 55 Minuten und 9 Secunden, nach Hannover und Thomsen im Mittel aus 22 Messungen 6 Grade 10 Min. und nach Griffin, wenn der Fleck besonders gross war, 7 Gr. 31 Min.

Sonach können wir mit H. E. Weber annehmen, dass der blinde Fleck in Bezug auf unser Sehfeld nahezu 6 Grad deckt, und uns daher beim Anblick des Himmels eine Scheibe, deren Durchmesser 11 mal grösser als der des Vollmondes ist, verdecken könnte.

267. Um den oben erwähnten Versuch auf eine bequeme Weise anstellen zu können, dient die nebenstehende Figur. Man schliesse das linke Auge und fixire mit dem rechten Auge unverwandt den Punkt zur Linken, während man das Blatt etwa 7 Zoll vom Auge entfernt. Die schwarze Scheibe (rechts) wird dann verschwinden, aber wieder zu Tage

Fig. 177.

*) Berichte der königl. Sächs. Ges. d. Wissensch., 1852. S. 149.

treten, wenn man das Blatt dem Auge näher oder ferner bringt. Für das Auge nun, worin die schwarze Scheibe verschwindet und also die von ihr ausgehenden Richtungslinien in den blinden Fleck einschneiden, erscheint der Ort der Scheibe im Sehfelde weiss, dagegen schwarz, wenn die Scheibe weiss und der Grund schwarz ist, überhaupt in der Farbe des Grundes, von welcher Art auch die abstechende Farbe der Scheibe sein mag.

Sonach bedingt die Lücke (der blinde Fleck) in der Netzhaut noch keineswegs eine Lücke in unserem Sehfelde; das Vorstellen ergänzt, wie es scheint, die Lücke des Sehfeldes mit dem Empfindungsmaterial, welches von den die Eintrittsstelle des Sehnerven umgebenden Retinaelementen geliefert wird.

Fällt aber das Retinabild einer geraden Linie von der einen Seite her zum Theil in den blinden Fleck hinein, ohne diesen jedoch nach der anderen Seite hin zu überragen, also wie in

Fig. 178.



Figur 178, (Nr. 1), wo *mn* den blinden Fleck bezeichnet; so erscheint die Linie um das Stück, welches auf *mn* fällt, verkürzt. Hingegen erscheint die Linie *ab* ununterbrochen, wenn sie, wie in Nr. 2, durch den blinden Fleck hindurchgeht, und zwar auch dann ununterbrochen, wenn sie selbst eine Lücke darbietet, die auf diesen Fleck fällt. Die Linie wird auf dem kürzesten Wege ergänzt, so dass das auf den blinden Fleck fallende Stück einer geschlängelten oder welligen Linie durch ein gerades ersetzt wird*). — So erscheint nun auch ein Kreuz, dessen Mitte auf den blinden Fleck fällt, vollständig, selbst wenn die Schenkel in der Mitte nicht zusammenstossen.

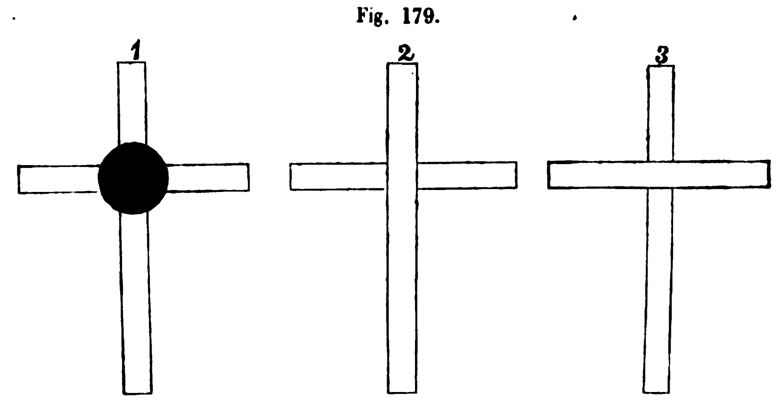
268. Man zeichne auf einem gleichfarbigen, etwa weissen Grunde ein Kreuz, dessen Balken zwei ungleiche Farben (etwa blau und gelb) darbieten, und bedecke ihren Kreuzungspunkt mit einer schwarzen Scheibe oder überhaupt mit einer Scheibe, deren Farbe von der Farbe des Grundes und der beiden Balken absticht. Sobald man nun diese Scheibe auf dem blinden Flecke zum Verschwinden bringt, erscheint das Kreuz vollständig auf weissem Grunde.

---

*) s. A. Fick und P. duBois-Reymond: Müller's Archiv. 1853.

Im Kreuzungspunkte wechseln aber die Farben beider Balken, so dass bald die eine, bald die andere als die obere und die andere

Fig. 179.



verdeckende auftritt (Fig. 179, Nr. 2 und 3). Von diesem Farbenwechsel bemerkt man aber nichts, wenn man eine Kreisscheibe in vier gleiche Sectoren theilt, die aneinander liegenden durch auffällige Farben unterscheidet, und die abstechende Scheibe im Centrum zum Verschwinden bringt. Die ganze Figur erscheint dann bis auf ihr Centrum, in richtiger Zeichnung und Farbe*).

Bei allen diesen Versuchen sieht man die Figuren indirect mit einem Auge, während man mit demselben einen seitlich gelegenen Punkt fixirt. Nun kommt es mir im Falle des Kreuzes (Fig. 179) vor, als ob an der Kreuzungsstelle die Farbe des vertikalen Balkens aufträte (Nr. 2), wenn ich die Aufmerksamkeit auf diesen Balken richte, dagegen (Nr. 3) die Farbe des horizontalen Balkens, falls ich diesen besonders beachte. Das Vorstellen hat, bezüglich des blinden Flecks das Bestreben, jeden Balken in seiner Farbe gerade fort zu ergänzen; die vorzugsweise Beachtung des einen Balkens hat aber zur Folge, dass gerade dieser als der obere und den anderen verdeckende auftritt; daher denn beim Schwanken der Aufmerksamkeit bald die eine, bald die andere Farbe an der Kreuzungsstelle auftreten kann. Hingegen scheint ein solcher Far-

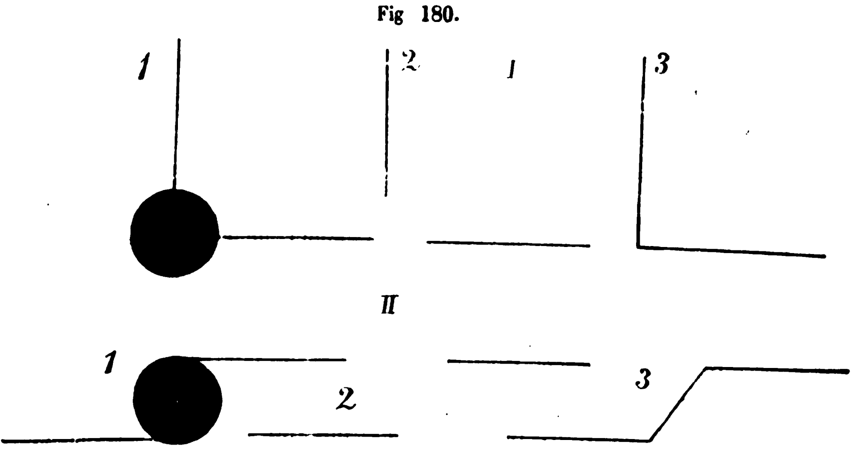
*) s. Volkmann: Ueber einige Gesichtsphänomene, welche mit dem Vorhandensein eines unempfindlichen Flecks im Auge zusammenhängen, in den Berichten über die Verhandlungen der königl. Sächs. Ges. der Wissensch. Leipzig 1853. S. 27; 40.



benwechsel im Falle des Kreises, wo jeder Sector im Vorstellen gerade nur bis zum Mittelpunkte ergänzt wird, nicht vorkommen zu können.

Bedeckt man die Peripherie eines Kreises irgendwo mit einer andersfarbigen Scheibe und bringt diese zum Verschwinden, so erscheint die Kreislinie entweder vollständig ergänzt, oder an dem Ort der Scheibe mit einer Lücke in der Farbe des Grundes*). Aehnliche Verhältnisse zeigen zwei Linien, die einen Winkel einschliessen (Fig. 180, N. I.) oder zwei gebrochene Linien (II.). Mitunter wird die Figur vollständig ergänzt (Nr. 3), zuweilen erscheint

Fig 180.



sie aber an der Stelle der Scheibe offen, und zwar in der Farbe des Grundes (Nr. 2). Ohne Zweifel hat hier die Form der Figur einen Einfluss auf die ergänzende Thätigkeit des Vorstellens, so dass die Ergänzung in einem Falle leichter als im anderen gelingt. Volkmann drückt dies so aus: „die Einbildungskraft, welche die Lücke im Sehfelde ergänzt, steht unter dem Einfluss der betrachteten Formen, und es scheint, dass dieser Einfluss in demselben Masse zwingender werde, als die Formen, auf deren Ergänzung es ankommt, uns geläufiger sind.“ Diese Wirkung der Einbildungskraft ist aber nach demselben**) auch abhängig von der Breite des Netzhautsaumes, welcher den blinden Fleck umgibt und sich im Zustande der Erregung befindet. Bringt man z. B. eine farbige Scheibe auf

---

*) s. Volkmann a. a. O. S. 39.

**) a. a. O. S. 42.

Gedrucktes und lässt das Bild derselben auf den genannten Fleck fallen, so ist die Lücke im Sehfelde mit Schriftzeichen erfüllt, die jedoch, wegen der geringen Sehschärfe in den Seitentheilen der Retina, nicht zu lesen sind. Vergrössert man aber die Buchstaben und die zwischen ihnen befindlichen Intervalle über ein gewisses Mass hinaus, so dass auch die farbige Scheibe von einem breiteren weissen Raume umgeben ist, so füllt sich die Lücke mit reinem Weiss.

269. Die bisherigen Versuche bezogen sich auf das Sehen mit einem Auge. Beim Gebrauche beider Augen kann nun die Lücke des einen Auges durch die Empfindungen ausgefüllt werden, welche von der dem blinden Flecke dieses Auges correspondirenden Stelle der anderen Netzhaut herrühren. Mit Rücksicht auf die früher betrachtete Eintheilung der Netzhaut in correspondirende und differente Stellen (S. 360 ff.) ergibt sich nämlich, dass die Eintrittsstellen der Sehnerven in beiden Augen nicht auf correspondirende, sondern auf differente Stellen fallen; daher dem blinden Fleck des einen Auges eine Stelle im anderen Auge entspricht, die für das Licht empfänglich ist. Die von dieser Stelle herrührenden Empfindungen werden aber gerade auf einen Ort im Sehfelde bezogen, welcher mit der durch den blinden Fleck in jenem Auge bedingten Lücke zusammenfällt. In Beziehung hierauf beschreibt Volkmann folgenden Versuch.

Man zeichnet auf einen weissen Papierbogen in einer Entfernung von ungefähr 5″ zwei grosse schwarze Punkte und in der Mitte zwischen beiden noch einen dritten kleinen. Hierauf legt man die flache Hand so an die Nase, dass sie eine undurchsichtige Wand zwischen beiden Augen bildet, und betrachtet den Papierbogen aus einer Entfernung von 1¼ Fuss in der Weise, dass man den mittleren und kleinsten der drei Punkte unverwandt fixirt. Es wird dann, wenn man das Papier dem Kopfe allmälig nähert, einmal dahin kommen, dass die beiden seitlichen Punkte gänzlich verschwinden, und zwar geschieht dies, wenn die von ihnen ausgehenden Richtungslinien auf die Eintrittsstellen des Sehnerven treffen. Nun wende man in dem Augenblicke, wo die beiden seitlichen Punkte vollständig verschwinden und also das Papier rein weiss erscheint, die vor die Nase gehaltene Hand mehr und mehr seitlich, so dass das eine Auge durch dieselbe mehr verdeckt, das an-



dere dagegen freier wird; dann kommt plötzlich der eine der verschwundenen Punkte zum Vorschein, und zwar derjenige, welcher auf der Seite des durch die Hand verdeckten Auges liegt. Der wieder erscheinende Punkt wird hiernach nicht durch das Auge auf seiner Seite, sondern durch das der gegenüberliegenden wahrgenommen; und vermittelst des letzteren wird er dahin gesetzt, wo sich die durch den blinden Fleck des anderen Auges bedingte Lücke des Sehfeldes befindet. — Für Ungeübte, die mit der Hand in der eben bezeichneten Weise nicht zu operiren verstehen, hat Volkmann*) eine einfache Vorrichtung mit einer drehbaren Fahne, welche die Rolle der Hand übernehmen soll, angegeben, eine Vorrichtung, die auch zur Anstellung der sonst hierher gehörigen Versuche geeignet ist.

270. Nun haben wir also beim Gebrauche beider Augen in Bezug auf den blinden Fleck *b* des einen Auges *o* zwei zusammenwirkende Factoren, nämlich einmal die Vorstellungsthätigkeit, die den diesem Fleck zugehörigen Theil des Sehfeldes auf Grund der Empfindung *e* auszufüllen strebt, welche von den empfindlichen Retinaelementen in der Umgebung von *b* herrühren, und zweitens die Empfindung *e'*, welche von der dem Fleck *b* correspondirenden Stelle *b'* im Auge *o'* veranlasst wird. Je nach den Umständen kann der eine oder andere Factor das Uebergewicht gewinnen, so dass in der Erscheinung des bezeichneten Ortes (im Sehfelde) entweder die Qualität der Empfindung *e* vorherrscht, welche von Seiten der Vorstellungsthätigkeit auf den betreffenden Ort bezogen wird, oder die Qualität der von der correspondirenden Stelle *b'* angeregten Empfindung *e'*. Der erste Fall ereignet sich nach Volkmann**), wenn man mit dem Auge *o*, welches die besagte Vorstellungsthätigkeit vermittelt, den Gegenstand unmittelbar, dagegen mit dem anderen Auge, welches mittelst der correspondirenden Stelle *b'* die Empfindung *e'* veranlasst, denselben durch ein gefärbtes Glas betrachtet. Und ebenso verhält es sich, wenn man das Auge *o'* verschliesst, wo dann nur die sensible Umgebung *r* des blinden Flecks, nicht aber zugleich die ihm entsprechende Stelle *b'* dem Lichte ausgesetzt ist. In beiden Fällen glaubt Volkmann annehmen zu

*) a. a. O. S. 47.
**) a. a. O. S. 45.

dürfen, dass der physiologische Process im Auge *o*, d.h. in der Umgebung des blinden Flecks, lebhafter sei, als in der Stelle *b'*, auf welche, beim Gebrauch beider Augen, das durch das farbige Glas gegangene diffuse Licht fällt. Dagegen gewinnt in allen sonstigen Fällen, wo beide Augen zum Sehen benutzt werden, die Empfindung von Seiten der correspondirenden Stelle *b'* das Uebergewicht.

Um hierüber einen Versuch anzustellen, betrachte man z. B. ein Kreuz, dessen mittlere Partie durch eine Scheibe verdeckt ist (Fig. 179), und zwar, wie in dem zuvor beschriebenen Versuche angegeben ist, mit vor die Nase gehaltener Hand, und bringe die Scheibe zum Verschwinden. Dann wird von Seiten der Vorstellungsthätigkeit die Form und Farbe des Kreuzes vervollständigt. Sobald dies erfolgt ist, wende man die Hand seitlich, und man wird bemerken, dass die Scheibe, die nun auf der correspondirenden Stelle *b'* sich abbildet, hervortritt und das Vorstellungsbild aus der Netzhautlücke verdrängt. Hieraus ergibt sich, bemerkt Volkmann*), dass, wo Vorstellung und Empfindung (letztere durch Affection der Stelle *b'* veranlasst) als Folgen eines gleich intensiven physiologischen Processes auftreten, die Empfindung die stärkere ist; wogegen man freilich bemerken kann, dass der so eben angeführte Versuch zu demselben Resultate führt, wenn die Scheibe, welche das Mittelstück des Kreuzes bedeckt, schwarz ist. Indessen erwähnt Volkmann selbst, dass unter den hierher gehörigen Versuchen sich einer befinde, der besondere Aufmerksamkeit verdiene. Betrachtet man nämlich eine schwarze Scheibe auf weissem Grunde in der Art, dass ihr Bild auf den blinden Fleck *b* des einen Auges *o* und zugleich auf die correspondirende Stelle *b'* des andern fällt, so sieht man dieselbe. Unter diesen Umständen fällt also das weisse Licht des Grundes auf die sensible Umgebung *r* des blinden Flecks im Auge *o* und das Schwarz der Scheibe auf die correspondirende Stelle *b'*. Wenn nun aber das Schwarze keine Lichtstrahlen aussendet, fällt hier auch auf *b'* kein Licht, und diese Stelle müsste sich demnach im Minimum ihrer Thätigkeit befinden. Warum siegt nun nicht, fragt Volkmann, *r* über *b'*, d. h. die lebhafte Vorstellung, die von Seiten der sensiblen Umgebung des

*) a. a. O. S. 46 f.

blinden Flecks erregt ist, über die matte Empfindung, die von *b'* herrührt?

271. Diese Frage gehört wohl nicht minder dem psychischen als dem physiologischen Gebiete an. Gewiss haben wir hier zu beachten, dass die Vorstellung des Schwarzen um so reiner und entschiedener auftreten muss, je weniger die Stelle *b'*, auf welche das Bild der schwarzen Scheibe fällt, vom Lichte afficirt wird, also gerade dann, wenn diese Stelle von Seiten der Scheibe gar kein Licht empfängt und sich im Minimum ihrer Thätigkeit befindet. In diesem Betracht kann man sagen, dass die Energie, womit die Vorstellung des Schwarzen in der Seele auftritt, um so grösser, je geringer der auf die Stelle *b'* bezügliche physiologische Process ist. Und sonach wird sich in unserem Sehfelde das Schwarze, wenn es wie hier vom Weissen umgeben vorliegt, um so mehr aus dem letzteren hervorheben, je intensiver beide im Vorstellen sind, d. h. je tiefer das Schwarz und je heller das Weiss, oder, mit anderen Worten, je grösser der qualitative Gegensatz zwischen Schwarz und Weiss im Bewusstsein ist. Vorstellung und Empfindung unterscheiden sich aber, psychologisch genommen, gar nicht, nämlich nicht in Bezug auf ihren qualitativen Inhalt; beide sind als Acte der Seele dasselbe. Die Empfindung einer Farbe ist die Vorstellung derselben in Gegenwart des sinnlichen Reizes, der sie veranlasst; ihre blosse Vorstellung, die sich durch geringere Lebhaftigkeit und Stetigkeit von der Empfindung unterscheidet, ist dieselbe Thätigkeit der Seele ohne Mitwirkung des physiologischen Processes, durch den sie ursprünglich veranlasst war. So habe ich die blosse Vorstellung einer Farbe, wenn dieselbe auf die eine oder andere Weise mittelbar reproducirt, oder in der blossen Erinnerung vergegenwärtigt wird. Der Empfindung des Schwarzen entspricht nun physiologisch, im Gegensatze zur Empfindung des Lichten, der von aussen ungereizte Sehnerv; dieselbe ist ein Zustand der Seele, der entsteht, wenn das Sehorgan (Retina und Sehnerv) auf denjenigen inneren Zustand zurückgeführt wird, welcher seiner eigenen, von aussen nicht alterirten, Selbstthätigkeit entspricht, und sie ist um so intensiver, je weniger die Retina oder ein Theil derselben von aussen angeregt wird, wie dies z. B. der Fall ist, wenn man die Augen schliesst und durch Verdekken mit der Hand alles äussere Licht von ihnen abhält, oder wenn eine möglichst schwarze Scheibe auf einem weissen Grunde liegt,

d. h. eine Scheibe, die möglichst wenig weisses Licht zu den Retinaelementen sendet, auf welche, den Richtungslinien gemäss, ihr Bild fällt. Die blosse Vorstellung des Schwarzen tritt aber dann hervor, wenn man bei offenen Augen sich ein der Wahrnehmung nicht darbietendes schwarzes Object, etwa eine Person in schwarzem Kleide, zu vergegenwärtigen sucht.

In dem obigen Versuche wird nun, wenn die schwarze Scheibe auf die blinde Stelle des einen Auges o trifft, das Bild derselben um so entschiedener in dem sonst weiss erscheinenden Sehfelde hervortreten, je weniger die correspondirende Stelle b' des anderen Auges o' vom Lichte gereizt oder in ihrer Selbstthätigkeit gestört wird. Die Seele sucht zwar die Lücke des Sehfeldes, welche durch die blinde Stelle im Auge o bedingt ist, im Vorstellen zu ergänzen, und zwar hier, wo der Grund weiss ist, durch Weiss; allein das letztere ist hier als ein bloss vorgestelltes (reproducirtes) vielleicht minder intensiv als die Empfindung des Schwarzen, welches von dem anderen Auge o' herrührt.

Im Vorstehenden ist angenommen, dass die Vorstellung (und Empfindung) des Schwarzen eben so wie die des Weissen ein positiver Zustand der Seele ist, der im Vergleich zur Empfindung des Weissen nicht ohne Weiteres als ein minder intensiver Act der Seele betrachtet werden darf, obschon die Wahrnehmung des Weissen allerdings insofern ein intensiverer Sehact wie die des Schwarzen ist, als dort das Organ mehr in Anspruch genommen ist und dies wohl auch noch zu gewissen Nebenempfindungen Anlass geben mag, während sonst, im Vorstellen des Nebeneinander, das Schwarze als Zustand der Seele sich sehr wohl gegen das Weisse behaupten kann, und zwar um so mehr, je reiner und intensiver beide Farben auftreten, oder je stärker ihr qualitativer Gegensatz ist.

Betrachtet man nun eine weisse Fläche mit einem Auge, während das andere geschlossen ist, so erscheint dieselbe überall weiss, indem nach dem Obigen die Lücke des Sehfeldes, welche durch den blinden Fleck des offenen Auges gesetzt ist, im Vorstellen mit der Farbe des Grundes ergänzt wird. Die Retina des verschlossenen Auges veranlasst aber in der Seele die Empfindung des Schwarzen, die sich, weil alle Elemente dieser Retina sich in demselben Zustande befinden, auf die Ge-

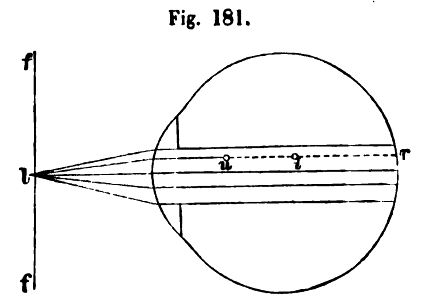
sammtwahrnehmung des anderen Auges überträgt. Das Schattenfeld des geschlossenen Auges überdeckt das helle Gesichtsfeld des offenen, d. h. die weisse Fläche erscheint, der Erfahrung gemäss, mit einem Auge etwas minder hell als mit beiden Augen. Eben so ist es, wenn man eine weisse Fläche mit dem einen Auge frei, mit dem anderen aber durch ein gefärbtes Glas, etwa durch ein blaues, betrachtet, so dass alle Retinaelemente dieses Auges von blauem Lichte afficirt werden, das nun, von Seiten der Seele auf die Wahrnehmung des vorerwähnten Auges übertragen, die weisse Fläche wie mit einem blauen Schimmer überzieht. Anders sind dagegen die Verhältnisse in dem obigen Versuche, wo das Bild einer schwarzen Scheibe auf den blinden Fleck *b* des einen Auges fällt, während man dieselbe zugleich mit der correspondirenden Stelle *b'* des anderen Auges wahrnimmt. Hier wird sowohl die sensible Umgebung des Flecks *b* als auch die Umgebung der correspondirenden Stelle *b'* von weissem Lichte afficirt; es entsteht ein lebhaftes Bild der weissen Fläche und im Contrast damit von Seiten der sehr wenig oder gar nicht afficirten Stelle *b'*, ein um so intensiveres Bild der schwarzen Scheibe, die sich nun im Vorstellen wegen ihres bedeutenden qualitativen Gegensatzes zu der weissen Umgebung, gegen diese vollständig behauptet.

F. Entoptische Gesichtserscheinungen.

272. In Folge des Umstandes, dass die optischen Medien des Auges nicht überall vollkommen durchsichtig sind, sondern hie und da Trübungen und kleine mehr oder minder undurchsichtige Körperchen besitzen, geschieht es, dass im Gesichtsfelde mitunter Erscheinungen (Schattenbilder) auftauchen, die sich wie äussere, d. h. ausser dem Auge befindliche, Objecte darstellen, obschon sie ihre wahre Veranlassung in jenen Unregelmässigkeiten, also in Objecten haben, die dem Auge selbst angehören; daher sie denn auch „entoptische Erscheinungen" genannt werden. Dieselben machen sich unter gewöhnlichen Umständen, nämlich beim gewöhnlichen Sehen mit wohl adaptirtem Auge, meist nur wenig oder gar nicht bemerklich, zumal wenn die sie bedingenden Unregelmässigkeiten, wie wohl in der Mehrzahl der Fälle, nur von geringen Dimensionen sind, und von verschiedenen Seiten her zu-

gleich beleuchtet werden. In solchem Falle bewirken sie auf der Retina, falls sie dieser nicht sehr nahe stehen, nur schwache Schattenbilder, die der Wahrnehmung sehr leicht entgehen. Nur dann, wenn sie auf der Retina einen Kernschatten werfen, werden sie deutlich zu Tage treten. Und dies geschieht, wenn in das Auge Lichtstrahlen von einem leuchtenden Punkte dringen, der ungefähr in der vorderen Brennebene des Auges liegt. Die Strahlen nehmen dann innerhalb des Auges (Glaskörpers) zueinander parallele Richtungen an, so dass alle undurchsichtigen Theilchen, die innerhalb des Auges von diesen Strahlen getroffen werden, auf die Retina einen Kernschatten werfen können. In nebenstehender

Fig. 181.



Figur bezeichnet *ff* die vordere Brennebene, *l* den leuchtenden Punkt, und *u* ein undurchsichtiges Theilchen, dessen Kernschatten auf *r* fällt. Dieser Schatten ist hier eben so gross als das undurchsichtige Object, von dem er herrührt; rückt aber der leuchtende Punkt *l* dem Auge näher, so divergiren die Strahlen im Glaskörper und der Schatten ist dann grösser als das betreffende Theilchen, während er kleiner als dieses wird, wenn der leuchtende Punkt sich über die Brennebene *ff* hinaus vom Auge entfernt, weil in diesem Falle die Strahlen im Glaskörper convergiren.

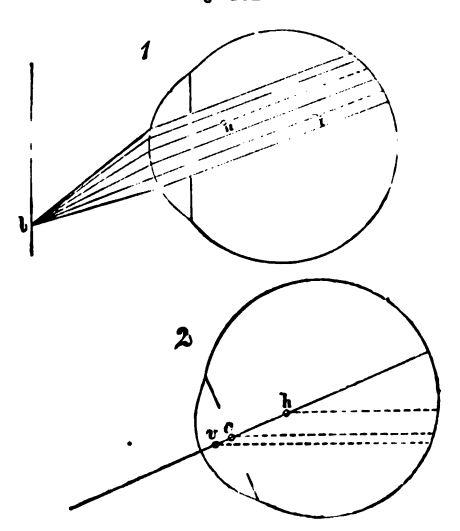
Den erforderlichen leuchtenden Punkt erlangt man leicht, wenn man mit einer feinen Nadel eine Oeffnung (von etwa $\frac{1}{2}$mm Durchmesser) in einen undurchsichtigen Schirm (Kartenblatt) sticht, denselben ziemlich nahe vor das Auge hält und durch die Oeffnung nach dem hellen Himmel oder einer weissen von der Sonne beleuchteten Wand (oder Papierfläche), oder endlich auf die Glocke einer Argand'schen Lampe sieht.

273. Zur Bestimmung der Lage der undurchsichtigen Par-

tikeln im Auge haben Listing*), Brewster**) und Donders***) Methoden angegeben, die wir hier im Princip andeuten wollen †).

Es ist klar, dass zwei oder überhaupt alle Objecte (von der bezeichneten Art), wenn sie in der Richtung eines Strahles hintereinander liegen, ihren Schatten auf eine und dieselbe Retinastelle werfen werden und darum nicht gesondert erscheinen können. Die Verhältnisse werden sich aber anders gestalten, wenn man das Auge hebt oder senkt, ohne die Lage des Lichtpunktes zu ändern, oder wenn man umgekehrt das Auge in seiner Lage erhält und dagegen den Lichtpunkt herauf- oder herunterschiebt. Geschieht das eine oder andere, wir wollen annehmen das letztere; so fallen jetzt die Schatten der beiden undurchsichtigen Objecte *u* und *i*, die bei


Fig. 182.



der Stellung des Lichtpunktes in Fig. 181 auf dem Wege eines Lichtstrahles lagen, auseinander (Fig. 182, Nr. 1). Gesetzt nun, man hat innerhalb der Sehaxe drei Objecte, deren Schatten bei der Stellung des Auges und der Lage des Lichtpunktes wie in

---

*) Beitrag zur physiologischen Optik, Göttingen 1845.

**) Philosophical Magaz. Ser. III. Vol. XXXII. p. 1.

***) Archiv für physiologische Heilkunde Bd. VIII. S. 30.

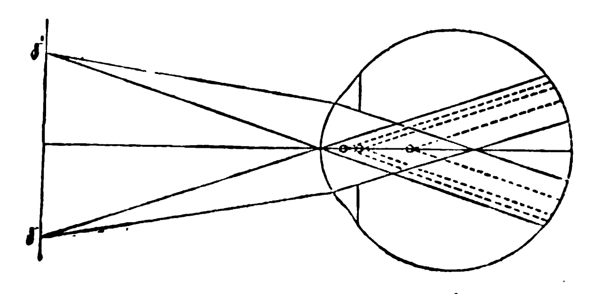
†) s. über die hierher gehör. Erscheinungen auch Helmholtz, Physiol. Optik, S. 148; — A. Fick, Medic. Physik, S. 340, u. Ludwig, Lehrb. der Physiol. Bd. I. S. 349.

Fig. 181 sich decken; dann werden, wenn man die Sehaxe senkt, den Lichtpunkt aber lässt, wo er ist, die Schatten dieser drei Objecte ebenfalls auseinander rücken. Doch bleibt dabei das Schattenbild des mittlern Objects *c*, falls es in der Ebene der Pupille liegt, in seiner Lage unverändert, nämlich immer in der Mitte des entoptischen Gesichtsfeldes, während auf der Retina der Schatten des vor der genannten Ebene gelegenen Objects *v* unterhalb, und der des hinter der Pupille gelegenen Objects *h* oberhalb des Schattens von *c* zu liegen kommt. Für uns selbst rückt also im entoptischen Gesichtsfelde, bei der bezeichneten Drehung des Auges, das Schattenbild des Objects *v*, im entgegengesetzten Sinne der Bewegung der Sehaxe, nach oben, dagegen das des Objects *h* mit der Sehaxe nach unten, wie man leicht findet, wenn man sich von den betreffenden Retinapunkten aus die entsprechenden Richtungslinien (durch den Knotenpunkt) gezogen denkt. Der Betrag der Verschiebung des Schattens ist aber um so grösser, je weiter das Object von der Pupillarebene entfernt ist.

Diese von der Bewegung der Sehaxe abhängige Lagenveränderung des Schattens eines entoptischen Objects nennt Listing „die entoptische Parallaxe", die entweder positiv oder negativ ist, je nachdem die Bewegung des Schattens im entoptischen Gesichtsfelde in demselben oder entgegengesetztem Sinne wie die Bewegung des in der Sehaxe gelegenen Visirpunktes geschieht. So ist die Parallaxe für ein Object, das seinen Sitz hinter der Pupillarebene hat, positiv, für ein vor derselben gelegenes Object aber negativ, während dieselbe für ein Object in der Pupillarebene gleich Null ist.

Nach der Methode von Donders und Brewster werden die

Fig. 183.



undurchsichtigen Objecte von zwei Lichtpunkten l, l' doppelt beleuchtet, wo dann jedes Object zwei Schatten auf die Retina wirft, wie die punktirten Linien in Figur 183 andeuten.

274. Zu den entoptischen Gesichtserscheinungen gehören unter andern die sog. fliegenden Mücken (mouches volantes), eine Erscheinung, die darin besteht, dass man vor den Augen in mehr oder minder grosser Menge schwarze (schattige) Objecte von rundlicher Form, theils als isolirte Kreise, theils perlschnurartig oder sonstwie miteinander verbunden sieht. Die Ursache dieser Erscheinung liegt in feinen, höchstens $\frac{1}{120}$ Linie im Durchmesser haltenden festen Partikelchen, die in der Glasfeuchtigkeit suspendirt sind und ihren Schatten auf die Retina werfen. Weil sie der Retina sehr nahe liegen, treten sie auch ohne besondere Beleuchtung (obiger Art) im Gesichtsfelde auf, und kommen auch in ganz gesunden Augen, oft sehr lange anhaltend, vor. Nach Brewster*), der den scheinbaren Durchmesser der mouches volantes und den Abstand jener Partikelchen von der Retina bestimmte, rühren die letzteren von den Resten der Gefässe her, welche die Glasfeuchtigkeit umschliessen**). Die Bewegung der sog. fliegenden Mücken ergibt sich als abhängig von den Drehungen des Auges.

Als anderweitige entoptische Gesichtserscheinungen findet man angeführt Perlflecken mit heller Mitte oder dunkle Flecke, von denen die ersteren, nach Listing, von Schleimmassen in der Magagni'schen Feuchtigkeit, die letzteren, nach demselben, von Trübungen in der Linsenkapsel herrühren sollen, während wieder andere Erscheinungen durch den strahligen Bau der Linsensubstanz bedingt sind. Und hier sei denn auch erwähnt, dass die strahlige (sternförmige) Beschaffenheit des Bildes, welches uns die an sich rund gestalteten Sterne gewähren, nach Helmholtz ihren Grund in dem strahligen Bau der Krystalllinse hat.

Auch die Erscheinungen, welche durch die Thränenflüssigkeit, durch das Secret der Meibom'schen Drüsen, durch Schleim und Staub auf der Hornhaut bewirkt werden, gehören hierher. So

---

*) Philos. Mag. Ser. III. Vol. XXXII pg. 1.

**) Näheres über diese Objecte findet man bei Doncan: de corporis vitrei structura. Dissert. Utrecht 1854; — u. Donders, Beitrag zur Bestimmung des Sitzes der entoptisch wahrnehmbaren Gegenstände, im Archiv für physiol. Heilkunde, Bd. VIII. S. 30.

erscheinen grössere Thränen- oder Oeltröpfchen auf der Hornhaut als dunkle Kreise mit heller Mitte. Blinzeln mit dem Auge verursacht aber meist, wie sich erwarten lässt, eine rasche Veränderung dieser Erscheinungen. Ebenfalls eine hierher gehörige Erscheinung entsteht, wenn man ein geschlossenes Auge drückt und reibt, wodurch die Hornhaut Falten erhält, die mehr oder minder lange andauern und die betreffende Erscheinung bedingen.

Wenn man mit einem Auge durch eine feine Oeffnung (in einem undurchsichtigen Schirme) nach einer hellen Fläche, etwa nach dem hellen Himmel sieht, erblickt man ein kreisrundes helles Feld, das vom Pupillarrand der Iris begrenzt ist. Schliesst und öffnet man nun das andere freie Auge, bei unverändertem Abstande des Schirmes vom erstgenannten Auge, abwechselnd, so gewahrt man eine abwechselnde Erweiterung und Verengerung des runden entoptischen Gesichtsfeldes, in Uebereinstimmung mit der sich erweiternden und verengernden Pupille. Denn wir wissen, dass wenn in das eine Auge z. B. eine grössere Lichtmenge fällt und sich darum die Pupille desselben verengert, auch die Pupille des anderen Auges eine Verengerung erfährt; daher muss, wenn sich das freie, bisher geschlossene Auge plötzlich öffnet, das entoptische Gesichtsfeld des anderen Auges kleiner werden.

Falten, Einschnitte oder Vorsprünge, die manchen Pupillen eigen sind, pflegen sich auch am Rande des entoptischen Gesichtsfeldes geltend zu machen*).

275. Eine interessante entoptische Gesichtserscheinung ist die sog. Purkinje'sche Aderfigur, nämlich die Schattenfigur, welche die Verzweigungen der arteria und ven. centralis retinae unter Umständen gewähren. Dieselbe wurde von Purkinje**) auf verschiedene Weise zur Darstellung gebracht und ihr Ursprung neuerdings von Heinr. Müller***) wissenschaftlich erklärt. Um sie wahrnehmbar zu machen, kommt es auf eine schickliche Beleuchtung der Gefässe an, wozu man sich des schon oben erwähnten Mittels bedienen kann, nämlich einer Oeffnung (von etwa $\frac{1}{2}$ bis 1^{mm} Durchmesser) in einem Schirme, den man nahe vor die Pupille eines Auges bringt. Man erblickt dann, wenn man durch die Oeffnung

*) s. A. Fick, Medic. Physik. S. 344.

**) Beiträge zur Kenntniss des Sehens. I. S. 89. II. S. 117.

***) Verhandl. der medic. Gesellsch. zu Würzburg. Bd. IV. S. 100, Bd.



nach dem hellen Himmel sieht und mit derselben vor der Pupille horizontal und vertikal hin und her fährt, eine baumartige Figur von verzweigten Gefässen, zu deren fortdauernder Sichtbarkeit die Bewegung der Lichtquelle verhilft, weil hierdurch der Kernschatten der Gefässe immer von Neuem auf vorher beleuchtete Stellen der Retina gelangt. Längeres Verweilen des Schattens auf denselben Netzhautelementen macht ihn blass und verwaschen, indem die Erregbarkeit dieser Elemente durch die andauernde Beschattung dergestalt gesteigert wird, dass das sie treffende schwächere Licht eine eben so starke Empfindung bewirkt, als das hellere Licht in den benachbarten, schon mehr ermüdeten Netzhautelementen. Die im Schatten gelegenen Retinaelemente gewöhnen sich gewissermassen an denselben und lassen ihn nicht mehr zu einer gesonderten Wahrnehmung gelangen; daher wir denn auch unter gewöhnlichen Umständen, wo von verschiedenen Seiten her Lichtstrahlen ins Auge dringen und die gerade hinter den Retinalgefässen gelegenen Elemente der Netzhaut im Halbschatten liegen, nichts von diesen Gefässen wahrnehmen *).

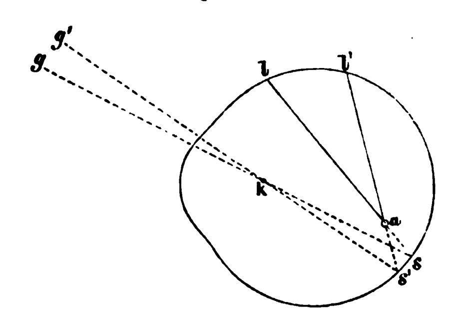
Nicht selten erscheint auch die Schattenfigur von einem hellen Saume umgeben, der, wenn er bedeutend vorwiegt, die Figur hell auf einem minder erhellten (dunklern) Grunde erscheinen lässt, was wahrscheinlich daher rührt, dass die bisher im Halbschatten gelegenen Retinaelemente, wenn sie nun vom Schatten befreit in die volle Beleuchtung kommen, wegen vorher gesteigerter Erregbarkeit, zu einer intensiveren Lichtempfindung Anlass geben.

276. Zweitens kann man die Aderfigur auch dadurch sichtbar machen, dass man das Auge auf eine schwarze Fläche richtet und mittelst einer Sammellinse von kurzer Brennweite das Bildchen der Sonne oder einer starken Lampenflamme auf eine Stelle der Sclerotica fallen lässt. Von hieraus dringen dann die Lichtstrahlen zum Theil durch die Sclerotica und Chorioidea ins Auge, zerstreuen sich in ihm und erleuchten die Retina hinreichend, mit Ausnahme der Stellen, auf welche der Schatten der Gefässe fällt. Man sieht dann die Aderfigur auf der schwarzen Fläche, die sich mit einem braunröthlichen Schimmer überzieht, dunkel hervortreten. In Figur 184 bezeichnet *l* den Lichtpunkt

*) s. Helmholtz, physiolog. Optik. S. 161.

auf der Sclerotica, *a* ein Gefäss und *s* den Schatten desselben auf der Retina. Die durch den Knotenpunkt *k* gehende Linie *sg* gibt dann die Richtung an, nach welcher der Schatten des Gefässes im Gesichtsfelde auftritt. Bewegt sich die Lichtquelle von *l* nach *l'*, so liegt nun der Schatten von *a* in *s'*, und wird in der Richtung *s'g'* gesehen. Also bewegt sich der Schatten scheinbar mit der Lichtquelle in gleichem Sinne.

Fig. 184.



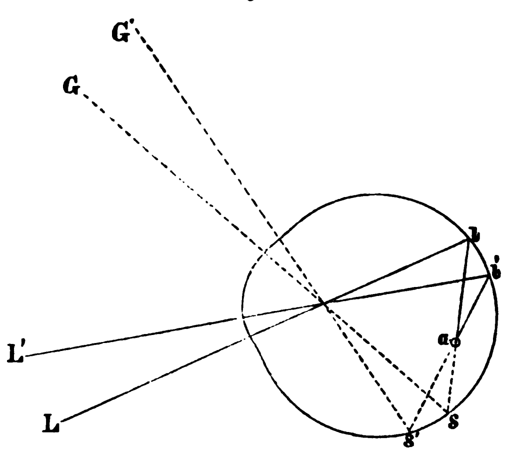
Gewiss ist die Grösse der Verschiebung, welche die Aderfigur im Gesichtsfelde erfährt, wenn man die Lichtquelle um eine bestimmte Grösse verrückt, durch die Entfernung der Gefässe von der Retinaschicht bedingt, auf welche der Schatten der Gefässe fällt; daher kann denn auch diese Entfernung, sobald die Lage des Knotenpunktes *k* numerisch bekannt ist, aus der Grösse der scheinbaren Verschiebung der Aderfigur bei einer gegebenen Verschiebung des Lichtpunktes berechnet werden, und wir haben bereits an einem anderen Orte*) bemerkt, dass H. Müller diese Berechnung ausgeführt und gefunden hat, dass die Zapfen- und Stäbchenschicht als die lichtpercipirende Schicht der Retina zu betrachten sei.

Drittens lässt sich die Aderfigur sichtbar machen, wenn man (Fig. 185) das Auge auf eine dunkle Fläche richtet, und seitlich von der Cornea eine Lichtflamme *L* anbringt, dergestalt, dass sie auf der Retina bei *l* ein Bild entwirft, das nun, indem sein Licht zerstreut wird, als Lichtquelle dient. Der Schatten des Gefässes *a* fällt dann auf die Retinastelle *s*, und erscheint im Gesichtsfelde nach der Richtung *sG*. Eine Bewegung des äusseren Lichtes von *L* nach *L'* bewirkt eine Verschiebung der inneren Lichtquelle im entgegengesetzten Sinne, von *l* nach *l'*, so dass nun der Schatten des Gefässes *a* auf die Retinastelle *s'* fällt und in der Richtung *s'G'* gesehen wird; daher sich der im Sehfelde sichtbare Schatten auch

*) S. 225.

hier in gleichem Sinne mit der äusseren Lichtquelle bewegt, falls nämlich die Bewegung derselben in der Ebene stattfindet, worin

Fig. 185.



diese Lichtquelle, ihr Bild und der schattenwerfende Gefässtheil enthalten ist. Anders verhält es sich dagegen, wenn man das Licht aus der bezeichneten Ebene, hier aus der Ebene des Papiers, herausrückt. Bewegt man z. B. das Licht *L* aus dieser Ebene heraus nach oben, so fällt sein Bild auf der Retina nach unten, das Schattenbild des Gefässes *a* aber nach oben, und daher das im Gesichtsfelde erscheinende Bild des Gefässschattens unter die genannte Ebene.

277. Bei den zuvor beschriebenen Versuchen sieht man in der Mitte des Gesichtsfeldes eine gefässlose Stelle: eine Scheibe von rundlicher Form, um welche sich rings die Aeste der Gefässe darstellen. Diese Stelle, die ihrer Lage nach dem gelben Fleck und seinem mittleren Theile, der fovea centralis (Netzhautgrube) entspricht, hat ein eigenthümliches Aussehen, das man dem von chagrinirtem Leder ähnlich gefunden hat. Auch bemerkten einige Beobachter*) in dieser gefässlosen Stelle einen ungefähr halbmondförmig gestalteten Schatten, der wahrscheinlich vom Rande der Netzhautgrube herrührt, und nach Meissner gegen die Mitte hin allmälig heller werdend in den glänzenden Theil der Scheibe übergeht. Derselbe läuft am Rande der Scheibe herum, wenn die

*) Burow in Müller's Archiv, 1854 S. 166; — Meissner, Beiträge zur Physiologie des Sehorgans, Leipzig 1854. S. 76 f., 80.

äussere Lichtflamme in Kreisen vor den Augen bewegt wird, erscheint aber nicht, wie man wohl erwarten könnte, an der der Flamme entgegengesetzten Seite, sondern an der Seite, wo sich die Flamme selbst befindet, so dass, wenn diese oben ist, auch der Schatten am oberen Rande der Scheibe auftaucht; was, wie mir scheint, mit der Art und Weise des letzterwähnten Versuches (Fig. 185), wo die Schattenbildung durch eine im Auge selbst hergestellte Lichtquelle zu Stande kommt, in Uebereinstimmung ist. Erzeugt man das Phänomen mittelst einer kleinen Oeffnung, die als Lichtquelle dient, so gewahrt man, bei Bewegung derselben, nach Meissner keine Spur von Schatten am Rande der gefässlosen Stelle, wohl aber in der Mitte oder etwas excentrisch, nach Ruete*), eine ganz kleine helle, an der einen Seite von einem schmalen dunklen Raume umgebene Stelle, die wie ein kleines Knöpfchen aussieht.

Sonderbar ist es aber, wie Meissner bemerkt, dass sich bei dem Versuche mit der Flamme, wenn man diese in Kreisen bewegt, nicht nur die Gefässfigur, sondern auch die mittlere gefässlose Stelle in Kreisen bewegt, selbst wenn die Sehaxe fest auf einen Punkt gerichtet bleibt. Nun hat zwar die Wahrnehmung der gefässlosen Stelle, meines Erachtens, nichts Auffallendes, da wohl die Lichtempfindungen, welche von Seiten der Retinaelemente dieser Stelle erregt werden, sich im gemeinsamen Gesichtsfelde, worin auch die Gefässe erscheinen, zusammen als eine helle Stelle geltend machen müssen, und eher das Gegentheil befremdend sein würde; allein die Bewegung derselben Stelle hat allerdings etwas Absonderliches. Indessen scheint es mir doch, als ob diese Bewegung mit der Bewegung des Schattens am Rande der bezeichneten Stelle und der Bewegung der inneren Lichtquelle bei dem dritten der oben erwähnten Versuche (Fig. 185) in nächster Beziehung stände. Bei dem Versuche mit der feinen Oeffnung zeigt sich nicht nur kein Schatten am Rande der hellen Stelle, sondern man gewahrt auch anerkanntermassen keine Bewegung der letzteren, wenn durch eine Bewegung der lichtgebenden Oeffnung die Gefässfigur verschoben wird. Die gefässlose Stelle erscheint, bei Fixation eines Punktes, immer an demselben Orte des Sehfeldes, während die Gefässe sich mit der Oeffnung bewegen.

---

*) Lehrbuch der Ophthalmologie, 1. Aufl. S. 141.

278. Eine ebenfalls hierhergehörige entoptische Erscheinung ist die zuerst von Steinbuch*) und dann von Purkinje**) und neuerdings auch von verschiedenen anderen Beobachtern***) genauer wahrgenommene Bewegung der Blutkörperchen in den Retinalgefässen. Dieselben erscheinen unter besonderen Umständen im Gesichtsfelde als weiss oder gelblich leuchtende Scheiben von verschiedener Grösse, die mit der Entfernung wächst, für welche man das Auge accommodirt. Meissner sah sie zum erstenmal zufällig, als er durch eine feine Oeffnung auf die helle Glocke einer Lampe hinstarrte, während er für sehr grosse Nähe accommodirte. Plötzlich verdunkelte sich das Gesichtsfeld und es traten in grosser Zahl dicht aber anfangs getrennt nebeneinanderstehende lichte Flecken von unregelmässiger Gestalt auf, die sich allmälig gewissermassen belebten, indem aus den ineinanderfliessenden Flecken weitere und engere, sich theilende, anastomosirende Gefässe wurden, in welchen die Blutkörperchen in rascher Bewegung verliefen, je nach dem Durchmesser des Gefässes nur in einer Reihe oder zu mehreren nebeneinander. Später fand derselbe folgende Methode, die ihm gestattete, sich den Kreislauf in den Retinagefässen fast jeden Augenblick sichtbar zu machen. „Während ein Auge geschlossen ist, sieht man, nach vorausgegangenem Druck auf dasselbe, unverwandt und ohne Augenlidschlag nach einer möglichst hellen Fläche, indem man z. B. durch eine Linse auf eine Lampenflamme sieht, dergestalt, dass kein Bild, sondern nur eine gleichmässig helle Fläche in der Oeffnung der Linse entsteht. Dann pflegt sich nach einiger Zeit das helle Gesichtsfeld in ein grünlich dunkles zu verwandeln, und wenn es gelingt, das letztere eine kleine Weile zu erhalten, sieht man jedesmal auf dieser dunklen Fläche den Kreislauf.“ Sein linkes Auge fand Meissner zu diesem Versuche besser geeignet als das rechte. Auch ich kann bei Befolgung der eben beschriebenen Methode die bezeichnete Erscheinung wahrnehmen, doch verschwindet mir dieselbe beim geringsten

*) Harless, Jahrb. der deutschen Medicin u. Chirurgie. III. S. 270.

**) Beiträge zur Kenntniss des Sehens. I. S. 127. II. S. 118.

***) Vierordt, Archiv für physiol. Medicin. 1856. S. 255; — Laiblin, die Wahrnehmung der Choroidealgefässe etc. Tübingen 1856; — Meissner, Beiträge zur Physiol. des Sehorgans, S. 84; — Ludwig, Lehrb. der Physiologie, Bd. I. S. 353.

Augenlidschlage. Bequem zur Darstellung derselben finde ich auch die Methode Vierordt's, nämlich mit einem Auge etliche Minuten gegen das hell erleuchtete Milchglas einer Lampe zu starren und dann mit ein wenig gespreizten Fingern vor dem Auge, etwa 120 mal in der Minute, hin und her zu fahren. Auf solche Weise kann ich mir die besagte Erscheinung wiederholt zu Tage fördern, jedoch allemal nur auf kurze Zeit, finde sie aber auch zuweilen noch, wenn ich das Auge schliesse. Ludwig sah mitunter auch bei einbrechender Abenddämmerung einzelne Scheiben im oberen Theile des Gesichtsfeldes, wenn das bisher durch die breite Krempe eines Hutes beschattete Auge plötzlich durch Erheben des gesenkten Kopfes oder der Krempe beleuchtet ward.

Noch auf eine andere Weise machen sich die Blutkörperchen im Gesichtsfelde bemerklich, und zwar durch eine leicht bemerkbare Erscheinung, die in der Wahrnehmung kleiner glänzender Lichtpunkte besteht, wenn das für die Ferne eingerichtete Auge den Strahlen einer blendend weissen Fläche, z. B. einer sehr hellen Wolke oder einem von der Sonne beschienenen Schneefelde, ausgesetzt ist. Diese Pünktchen haben einige Aehnlichkeit mit den sog. fliegenden Mücken, unterscheiden sich aber von diesen eben durch ihre Helligkeit und durch ihre Bewegungen, die unabhängig von den Drehungen des Auges stattfinden. Mehrere im Gesichtsfelde nacheinander auftretende Pünktchen verhalten sich in Bezug auf die von ihnen beschriebenen Bahnen, so wie hinsichtlich der Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit ganz analog. Den Ursprung dieser hellen Pünktchen glaubt man in den Blutkörperchen gefunden zu haben, insofern diese, gleich kleinen Linsengläsern, das sie von aussen durchdringende Licht auf der Retina concentriren. —

Einige andere Lichterscheinungen, die man allenfalls noch unter den entoptischen Gesichtswahrnehmungen aufführen könnte, werden wir gelegentlich, im Verlauf des nächsten Kapitels, das von den Licht- und Farbenempfindungen handelt, hervorheben.



Viertes Kapitel.

Von den Licht- und Farbenempfindungen insbesondere.

279. Von welcher Art auch die Einwirkungen auf das Sehorgan sein mögen: die dadurch in der Retina und dem Sehnerven erregten Reizzustände lösen im Centralorgan immer nur eine Lichtempfindung aus. So haben nicht allein die Wellen des Aethers, sondern auch mechanische Einwirkungen auf den Augapfel, wie Druck, Stoss und Zerrung Lichtempfindungen zur Folge. Zeugniss hiervon geben die lichten Kreise, die man wahrnimmt, wenn man das Auge mit einem Finger an besonderen Stellen drückt, ebenso im geschlossenen Auge die mannigfachen Farbenempfindungen, die je nach der Stärke des auf das Auge ausgeübten Druckes und sonstigen Umständen in verschiedenem Wechsel vorkommen, wie auch der sog. Lichtstaub, der im dunklen Sehfelde bei verschiedenen Personen in verschiedenem Masse auftaucht, und in Bezug auf welchen Purkinje sagte: es schwebe in der Dunkelheit ein Chaos von Licht. Und endlich kann auch der elektrische Strom*), wenn er ins Auge geleitet wird, Farbenempfindungen erregen. Aus dem allen folgt aber, was wir schon anderwärts in Hinsicht auf das äussere Licht hervorgehoben haben, dass nämlich das, was wir Farbe nennen, nur ein Zustand des Centralorgans (insbesondere der Seele) ist, dem gewisse durch die angeführten Ursachen bewirkte Reizzustände der Retina und des Sehnerven voraufgehen.

280. Freilich sind nun für die Wahrnehmung der äusseren Gesichtsobjecte nur diejenigen Lichtempfindungen von Bedeutung, welche ihren Anlass in den Aetherwellen haben, die von diesen Objecten herkommen.

Bekanntlich **) entsprechen den verschiedenen homogenen Farben, wie sie uns z. B. durch Zerlegung des Sonnenlichtes in einem prismatischen Medium erscheinen, Aetherwellen von bestimmter, aber verschiedener Länge oder, was damit in unmittelbarster Beziehung steht, Wellen von bestimmter Oscillationsgeschwindigkeit

---

*) s. hierüber die Beobachtungen von Ritter, Pfaff u. Purkinje bei Du Bois-Raymond. Thierische Elektricität, Bd. I. S. 284 u. 345.

**) S. 148 ff.

der zugehörigen Aethertheilchen. So kommt den Aetherwellen, welche die Empfindung der homogenen rothen Farbe bewirken, die grösste Länge und demgemäss die geringste Oscillationsgeschwindigkeit der sie constituirenden Aethertheilchen zu. Während aber Aetherundulationen, deren Wellenlänge über die der äussersten rothen Strahlen (im Sonnenspectrum) hinausgeht, keine Lichtempfindung mehr bewirken, sondern lediglich dem Bereich der Wärme angehören, können dagegen alle Undulationen, deren Wellenlänge kleiner als die der bezeichneten rothen Strahlen ist, noch zu Farbenempfindungen führen. So machen die sog. übervioletten Strahlen, die man früher allgemein für unsichtbar hielt, nach Helmholtz und Stokes bei schwacher Intensität den Eindruck von Indigblau und bei stärkerer Intensität die Empfindung einer weissblauen Farbe. Diese Strahlen werden von gewöhnlichen Glasprismen, wenn man sie zur Darstellung des Farbenspectrums benutzt, nicht unbeträchtlich absorbirt, weniger dagegen von Quarzprismen, daher man sich solcher zur Aussonderung der übervioletten Strahlen zu bedienen pflegt.

281. Die Vereinigung aller einfachen Aetherwellen, welche durch das Prisma in gesonderten Wirkungen auftreten und in uns, wenn sie einzeln das Auge afficiren, eben so viele homogene Farben erregen, gibt als resultirende die Empfindung von Weiss, die auch noch gewonnen wird durch die Mischung einer gewissen Anzahl von Spectralfarben zu zweien, die man, weil sie zusammen Weiss geben, complementäre Farben *) nennt, während sonst aus der Mischung verschiedener homogener Farben andere Farbentöne resultiren. Die Empfindung der Mischfarbe kann aber auf verschiedene Weise herbeigeführt werden: entweder dadurch, dass die sich zusammensetzenden Aetherwellen vereinigt ins Auge dringen und also gleichzeitig die Netzhaut afficiren, oder so, dass sie einzeln, aber im raschen Nacheinander auf eine und dieselbe Netzhautstelle wirken. In ersterer Beziehung erwähnen wir hier noch ein Verfahren von Czermak **), das von dem Scheiner'schen Versuche (§. 163) zum Behufe der Farbenmischung Anwendung macht. Die beiden Componenten liefern hier zwei farbige Gläser, von denen man das eine vor die eine Oeffnung und das zweite vor die andere

*) S. 93 ff.

**) Sitzungsberichte der kais. Akademie zu Wien, Bd. XVII. S. 565.

Oeffnung des undurchsichtigen Schirmes setzt. Auf diese Weise entstehen auf der Netzhaut des betreffenden Auges zwei verschiedenfarbige Zerstreuungskreise, die sich theilweise decken, und da, wo dies stattfindet, geschieht die Mischung der beiden gegebenen Strahlenarten.

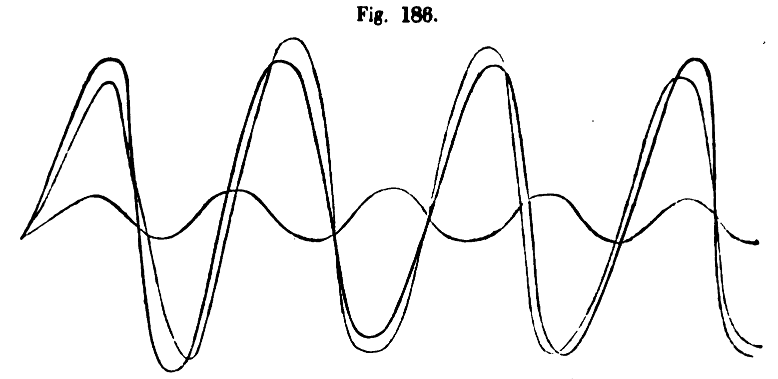
282. Man hat wohl schon öfter daran gedacht, dass bei Erzeugung der Sinnesempfindungen auch in den Nerven Schwingungen, von aussen angeregt, sich fortpflanzen möchten. In Bezug auf die Lichtempfindungen würden also zunächst die Elemente der Retina (Zapfenschicht) durch die Undulationen des Aethers zu ähnlichen Schwingungen angeregt werden. Neuerdings hat nun Grailich*) die resultirende Bewegung eines Netzhauttheilchens, das von zwei verschiedenen einfachen Farbenstrahlen getroffen wird, zu bestimmen gesucht. Die specifische Farbenempfindung ist zunächst bedingt durch die Zeit, während welcher das Nethhauttheilchen aus seiner Gleichgewichtslage verrückt bleibt, wie auch sonst die oscillatorische Bewegung während dieser Zeit beschaffen sein mag. Wenn aber die Empfindung einer gemischten Farbe entsteht, empfängt die Retina durch die beiden Componenten in rascher Folge verschiedene rhythmisch wiederkehrende Eindrücke, aus welchen sich nach einer gewissen Dauer dieser Einwirkung die Farbenempfindung entwickelt. Insofern nun der Ton einer homogenen Farbe durch die Wellenlänge vollkommen bestimmt ist, muss auch der resultirende Ton eines Farbengemisches eine Function der Wellenlängen sein, die sich periodisch in demselben erzeugen. Während es aber im homogenen Strahle, bezüglich der Rechnung, gestattet ist, für die Wellenlänge sowohl die Distanz (*bf*, Fig. 71. S. 118) zweier Maxima der Sinuslinie, — welche die Schwingungscurve darstellt, — als auch das Intervall zwischen zwei homologen Knotenpunkten (*ae* Fig. 71) anzunehmen, verhält es sich anders bei gemischten Farben, deren Schwingungscurve keinenfalls die Sinuslinie werden kann; hier besteht ein Unterschied zwischen jenen Grössen, indem die Maxima der Ausschläge im Allgemeinen nicht mit der Mitte des Abstandes zweier Knotenpunkte zusammenfallen, sondern bald näher dem einen, bald näher dem anderen Knotenpunkte liegen und überdies bei manchen der re-

*) Sitzungsberichte der kais. Akad. in Wien. Bd. XII. S. 783, Bd. XIII. S. 201.

sultirenden Curven selbst zwei und bei mehr als zwei homogenen Componenten sogar mehr als zwei Maxima aufeinander folgen, ohne dass die Curve inzwischen die Axe schneidet. Die periodische Natur der resultirenden Bewegung ist also nicht so einfach wie bei einem homogenen Farbenstrahle; dieselbe besitzt grössere Perioden, deren jede in eine Reihe nicht isochroner Schwingungen zerlegbar ist.

283. Bei Ableitung der Schwingungscurve, die aus dem Zusammenwirken zweier verschiedener homogener Strahlen des Spectrums resultirt, nimmt Grailich*) der Einfachheit wegen an, dass die beiden Componenten (von verschiedener Wellenlänge) geradlinig in derselben Ebene polarisirt seien, wo sich dann die resultirende Bewegung eines von beiden Strahlen afficirten Netzhautmoleculs durch algebraische Summirung der betreffenden Oscillationsausschläge bestimmen lässt, indem man, bei graphischer Darstellung des Schwingungszustandes, die diese Ausschläge repräsentirenden Ordinaten addirt oder subtrahirt, je nachdem sie auf derselben Seite oder auf entgegengesetzten Seiten der Abscissenaxe liegen. In der untenstehenden Figur bezeichnet die stark ausgezogene Linie die resultirende Schwingungscurve aus Indigo und Gelb, deren Schwingungscurven durch die beiden schwach aus-

Fig. 186.



gezogenen Wellenlinien angegeben sind, und zwar gehört die mit dem grösseren Bogen dem Gelb, die andere dem Blau an.

Bei der resultirenden Curve kommen aber drei Elemente in Betracht, die Grailich ermittelte, nämlich 1) die rhythmisch wieder-

*) Ber. Bd. XIII. S. 201.

kehrenden Wellenschläge innerhalb einer grossen Periode; 2) die Amplitude, welche jedem dieser Wellenschläge entspricht; und 3) die Intensität, mit welcher jeder dieser Wellenschläge zur Bildung des Gesammteindruckes mitwirkt.

Wenn nun die Empfindung der gemischten Farbe durch rasche Aufeinanderfolge verschiedener rhythmisch wiederkehrender Eindrücke entsteht, so können die gleichartigen Vibrationen der nacheinander folgenden Perioden sich zu eben so vielen einfachen Farbenempfindungen zusammensetzen, als in der einzelnen Periode verschiedene Vibrationen vorkommen, und die Empfindung der Mischfarbe ist, vermöge der raschen Wiederkehr der einzelnen Eindrücke, das Gesammtresultat aller dieser einfachen ineinander greifenden Farbenempfindungen.

284. Grailich*) hat nun für eine Reihe von Farbenmischungen die Perioden, welche durch das Zusammenwirken der beiden Componenten entstehen, in ihre einzelnen chromatischen Elemente aufgelöst; so in folgender Tabelle für die farblosesten dem Weiss zunächst liegenden Mischtöne. Die Mischung von Indigo und Gelb gibt den Eindruck des reinen Weiss, während Violett und Gelb einen weisslich fleischfarbenen und Blau-Gelb einen schwach grünlich weissen Ton geben. Indess hebt Grailich hervor, dass die von ihm gewählten Componenten nicht genau mit den von Helmholtz ermittelten zusammenfallen. Am grössten ist die Abweichung bezüglich des Gelb, das hier dem Grün merklich näher liegt als von Helmholtz festgestellt ist, und daher mit zu geringer Amplitude in die Mischung eingeht. In Rücksicht der Intensität wurden die Fraunhofer'schen Zahlen für die Intensitäten der Spectralfarben des Sonnenlichtes (S. 83 ff.) zu Grunde gelegt. Die Zahlen der nachstehenden Tabelle sind die Amplituden der Einzelerregungen, und die Klammern zeigen die einzelnen, in einer grossen Periode enthaltenen, bei der Farbenwirkung in Betracht kommenden Nebenperioden an.

Violett-Gelb.	Indigo-Gelb.	Blau-Gelb.
{99 Gelblichgrün.	{109 Schwachgrünlichgelb.	{120 Grünlichgelb.
{91 Gelb.	97 Gelb.	109 Gelb.
	84 Orange-Gelb.}	90 Gelblichorange.
		113 Röthlichorange.}

*) Sitzungsb. der kais. Acad. Bd. XIII. S. 201; 264 ff.

Violett - Gelb.

86 Gelb.
91 Gelb.
99 Gelblichgrün.
99 Gelblichgrün.
91 Gelb.
86 Gelb.

91 Gelb.
99 Gelblichgrün.
99 Gelblichgrün.
91 Gelb.
86 Gelb.

91 Gelb.
99 Gelblichgrün.
99 Gelblichgrün.
91 Gelb.
86 Gelb.

91 Gelb.
99 Gelblichgrün.
99 Gelblichgrün.
91 Gelb.
86 Gelb.
91 Gelb u. s. f.

Indigo - Gelb.

80 Gelblichorange.
91 Schwachorange-lichgelb.
105 Grünlichgelb.
101 Grünlichgelb.
105 Grünlichgelb.
91 Gelb.
80 Orange.

84 Orangegelb.
99 Gelb.
109 Grünlichgelb.
109 Grünlichgelb.
97 Gelb.
84 Orangegelb.
80 Orange.

91 Gelb.
105 Grünlichgelb.
101 Grünlichgelb.
105 Grünlichgelb.
91 Orangelichgelb.
80 Gelblichorange.

84 Orangegelb.
90 Gelb.
109 Schwachgrünlich-gelb.

Blau - Gelb.

113 Röthlichorange.
90 Gelblichorange.
109 Gelb.
120 Grünlichgelb.
120 Grünlichgelb.
109 Gelb.
99 Gelblichorange.
113 Röthlichorange.

113 Röthlichorange.
109 Gelblichorange.
120 Gelb.
120 Grünlichgelb.
120 Grünlichgelb.
109 Gelb.
90 Gelblichorange.
113 Röthlichorange.

113 Röthlichorange.
90 Gelblichorange.
109 Gelb.
130 Grünlichgelb.
130 Grünlichgelb u. s. f.

Die Empfindung des Weiss setzt sich hiernach zusammen aus den rasch abwechselnden Eindrücken der mittleren Töne des Spectrums von Gelblichgrün bis zu Orange.

Von den Folgerungen, die Grailich aus seiner Untersuchung zieht, führen wir hier noch an: 1) dass die fahlsten Mischtöne diejenigen sind, in welchen die gelben und benachbarten Elemente vorherrschen; 2) dass der Mischton zweier homogener Componenten von verschiedener Wellenlänge niemals gleich sein kann einem homogenen Tone des Spectrums, sondern stets minder gesättigt erscheinen muss, woraus weiter die Unmöglichkeit hervorgeht, aus Blau, Roth und Gelb, oder Violett, Grün und Roth, oder irgend einer anderen beliebigen Anzahl von Grundfarben die anderen Farben des Spectrums darzustellen; so dass gar kein, einer homogenen Farbe identischer Farbenton durch Mischung erzeugt werden kann.

285. Sämmtliche Methoden der Farbenmischung, die wir

früher beschrieben haben*), sind von der Art, dass die verschiedenen Componenten entweder von demselben Orte ausgehend zugleich oder in raschem Nacheinander eine und dieselbe Netzhautpartie afficiren. Hier erhält man immer, mag man nun ein Auge gebrauchen oder mögen beide Augen in gleicher Weise von den Componenten getroffen werden, die Empfindung einer Mischfarbe, bei der man nichts von jenem Phänomen bemerkt, das unter dem Namen des Wettstreites der Sehfelder bekannt ist. Bevor wir auf diese Erscheinung näher eingehen, sei hier noch hervorgehoben, dass unter gewissen Umständen doch keine vollkommene Mischung zweier farbiger Componenten statt hat, selbst wenn diese eine und dieselbe Netzhautstelle eines Auges zugleich afficiren, wie aus dem folgenden von Volkmann**) mitgetheilten Versuche hervorzugehen scheint. Man betrachtet einen farbigen Papierstreifen, beträchtlich schmäler als der Durchmesser der Pupille, etwa 3″ vom Auge entfernt vor einem andersfarbigen Hintergrunde, der etwa 12 bis 15″ vom Auge absteht, so dass man durch den farbigen Streifen hindurch den andersfarbigen Hintergrund sieht. Dabei machte Volkmann folgende Bemerkungen. „Die beiden Farben des Papierstreifens und Hintergrundes geben in keinem Falle die zu erwartende Mischfarbe, sondern höchstens einen schmutzigen Farbenton, der zu jener hinneigte, aber auch dies selten. In der Regel sieht man nur eine Farbe, entweder die des Hintergrundes oder die des vorderen Streifens, welche zwar allerdings eine Veränderung erfahren hat, aber nur insofern als sie minder intensiv, gleichsam verwaschen und anders beleuchtet erscheint, indem sich auch hier das Lichte und Schattige beider Farben gewöhnlich zu einem mittleren Eindruck ausgleicht, wovon nur diejenigen Farben eine Ausnahme zu machen scheinen, bei welchen aus subjectiven Gründen die Wahrnehmung des Contrastes sich geltend macht.“ — Als verschiedene Umstände, die darauf Einfluss haben, welche der beiden gleichzeitig ins Auge fallenden Farben zur Wahrnehmung kommt, führt Volkmann folgende an. Wenn nur eine der beiden Farben exclusiv wahrgenommen wird, ist dies entweder die hellere, besonders wenn die Helligkeit mit

*) S. 90—102.

**) Müller's Archiv. 1838. S. 373. — Art. Sehen in Wagner's Handw. d. Physiol. Bd. III. Abth. 1. S. 326.

Glanzlicht verbunden ist, oder die Farbe des fixirten Objects, oder endlich diejenige, auf welche die Aufmerksamkeit gerichtet ist. Wenn trotz der Fixation des Hintergrundes, sagt Volkmann, dennoch die Farbe des vorderen Papierstreifens gesehen wird, so gelingt es, aber nur bei gewissen Farbentönen, durch die Kraft des Willens diese Farbe zu verbannen und ihr died es Hintergrundes zu substituiren; dabei fühlt sich das Auge angestrengt und es hängt auch nicht vom Willen des Beobachters ab, die substituirte Farbe sich anhaltend zu vergegenwärtigen; vielmehr tritt dann ein Schwanken der Empfindung ein, und es erscheint abwechselnd und in nicht zu bestimmenden Intervallen bald die Farbe, welche man sehen will, bald diejenige, welche man nicht sehen möchte, und die bei mangelnder Anspannung des Geistes allein auftritt.

286. Ich wiederholte diese Versuche mit einer Reihe von farbigen Papieren, dergestalt, dass ich ein schmales farbiges Papierstreifchen vor einem andersfarbigen Papierbogen, der als Hintergrund diente, in der oben bezeichneten Weise betrachtete. Brachte ich das Streifchen dem Auge sehr nahe, so sah ich, falls das Streifchen hinreichend schmal war, nur entschieden die Farbe des Hintergrundes, jedoch bei lebhafter Farbe des Streifchens etwas modificirt, meist etwas minder intensiv. Diese Modification nahm zu, wenn das Streifchen allmälig entfernt wurde, und es stellte sich, wenn die Entfernung des Streifchens vom Auge eine gewisse Grösse erreicht hatte, eine Art von Mischfarbe ein, die bei manchen Farbentönen (des Streifchens und Hintergrundes) nur eine sehr geringe Abweichung von der verrieth, welche man auf sonstige Weise, durch eine der früher beschriebenen Methoden der Farbenmischung, mit denselben Componenten erhält. Doch veränderte sich diese Färbung nicht selten, wenn die Farben des Streifchens und Hintergrundes miteinander vertauscht wurden. Bei abwechselnder fester Einstellung des Auges für den Streifen und Hintergrund sah ich abwechselnd die eine und andere Farbe, indess bei Fixation des Hintergrundes die Farbe desselben etwas modificirt, manchmal in jener vorerwähnten Mischfarbe, die jedoch bei längerer Fixation des Hintergrundes nicht selten durch dessen Farbe verdrängt wurde, was aber, wie es schien, schwerer anging, wenn die Farbe des Streifens im Vergleich zu der des Hintergrundes sehr lebhaft war. Um keiner Täuschung zu unterliegen, ist es wesentlich, dass die Entfernung des Streifchens vom



Auge unverrückt erhalten wird. Bringt man dasselbe dem Auge näher, während dieses für den Hintergrund adaptirt ist, oder rückt man den letzteren, bei constanter Entfernung des Streifchens, weiter fort, so kann es sehr leicht geschehen, dass die Farbe des Hintergrundes entschiedener hervortritt. Ueberhaupt wird mit der Abänderung der gegenseitigen Entfernung des Streifchens und Hintergrundes sich auch die Erscheinung zu Gunsten der einen oder anderen Farbe verändern. Auch dürfen die Beleuchtungsverhältnisse für den Streifen und Hintergrund während der Beobachtung nicht beträchtlich verändert werden, und darf man sich natürlich nicht so stellen, dass vom Streifen fast alles Licht, etwa durch den Kopf, abgehalten wird, wo sich dann der Streifen nur als ein Dunkles auf dem Hintergrunde absetzt, was auch sonst der Fall ist, wenn die Farbe des Streifens gegen die des Hintergrundes sehr matt ist. — Wenn mir nun bei fixirtem Streifen etwa die Farbe des Hintergrundes entschieden entgegentrat, bemerkte ich meist, dass sich das Auge für diesen adaptirt hatte, und umgekehrt, dass sich das Auge für den Streifen eingerichtet hatte, wenn bei absichtlicher Fixation des Hintergrundes plötzlich die Farbe des Streifens entschieden auftauchte. Nur bei Anwendung mancher Farbentöne (z. B. bei Grün und Roth) schien es mir, dass, wenn ich die eine Farbe fest fixirte, sich zuweilen auch die andere, ohne Veränderung der Adaption des Auges, geltend machte; doch habe ich darüber nicht zur vollkommnen Gewissheit gelangen können.

Ohne Zweifel sind nun bei diesen Versuchen die Verhältnisse anders als da, wo nach den früher beschriebenen Methoden die Erregung einer und derselben Netzhautstelle durch zwei verschiedenfarbige Componenten zu einer wirklichen Mischfarbe führt. Bei diesen Methoden ist eine wechselnde Adaption des Auges für die eine oder andere Componente, wie dort, nicht wohl möglich; beide Componenten gelangen entweder gleichzeitig von demselben Orte oder in raschem Nacheinander in der ihnen zukommenden und durch das Auge nicht veränderten Intensität zu den betreffenden Netzhautstellen. Was aber die Mischung verschiedenfarbiger Körpertheilchen anlangt, so wissen wir (S. 102), dass hier keine eigentliche Farbenmischung stattfindet, sondern nur eine Aussonderung gewisser Farbestrahlen (Aetherwellen), welche die erscheinende Farbe des Gemenges bedingen; daher denn auch hier nicht gesagt werden kann, dass ein durch Mischung von

Gelb und Blau erhaltene grüne Farbe aus gelben und blauen Molecülen bestehe, welche den Eindruck der Einheit machen, weil die auf der Netzhaut übereinander greifenden Farbenbilderchen von dem Sehorgane zur Mischfarbe verschmolzen würden. Vielmehr entsteht aus der Mengung eines blauen und gelben Pulvers die grüne Farbe, weil die blauen und gelben Partikelchen zusammen die sog. grünen Strahlen in vorherrschender Menge zum Auge senden, so dass hier Grün nicht die Mischfarbe aus Blau und Gelb ist. Und ebenso verhält es sich, wenn man durch verschiedenfarbige Gläser, die aufeinander gelegt sind, gegen einen hellen Grund sieht. Wie aber in einem Gemisch verschiedener homogener Farbenstrahlen, worin bestimmte Strahlen in überwiegender Menge vorkommen, durch diese letzteren der Farbenton des ganzen Eindrucks vorzugsweise bestimmt wird, so könnte allenfalls in den obigen Versuchen die eine Farbe, wenn sie besonders lebhaft oder wegen der Adaptionsverhältnisse des Auges vorzugsweise auf der Netzhaut concentrirt ist, in ihrer Art entschieden hervortreten, obschon etwas modificirt durch die Strahlen der anderen Farbe.

287. Im Jahre 1806 machte de Haldat*) die Wahrnehmung, dass, wenn er vor beide Augen verschieden gefärbte Gläser hielt, eine Mischfarbe entstand, wie sie sonst aus der Vereinigung beider Farben zu erwarten war. Seitdem wurden hierüber hin und wieder Versuche angestellt, von denen jedoch die meisten gegen die Angabe de Haldat's sprachen. Anstatt der entsprechenden Mischfarbe tauchte nämlich abwechselnd bald die eine, bald die andere Farbe im Gesichtsfelde auf, und wenn auch zuweilen eine Verschmelzung beider Farben stattzufinden schien, so war man doch nicht geneigt, den resultirenden Farbenton als die eigentliche Mischfarbe der beiden Componenten zu betrachten. Und so erschien es lange zweifelhaft, ob zwei verschiedene Farben, von welchen die eine das eine, die andere gleichzeitig das andere Auge (in correspondirenden Retinastellen) afficirt, in gleicher Weise zu einer Mischfarbe verschmelzen, wie es der Fall ist, wenn die Strahlen beider Farben auf eine und dieselbe Netzhautpartie eines Auges wirken. Den angedeuteten Wechsel zwischen den beiden gegebenen Farben bezeichnete man nun eben durch den Namen des Wettstreites der Sehfelder.

---

*) Journ. de Physique.

Dagegen fand Dove *) durch Anwendung des Stereoskopes dass die in demselben beiden Augen dargebotenen Farben sich wirklich zu derselben Resultante combiniren, welche entstehen würde, wenn sie beide gleichzeitig dieselbe Netzhaut afficirten. So gelang es ihm, aus zwei Complementärfarben Weiss darzustellen. Derselbe wählte hiezu die durch polarisirtes Licht entstehenden Farben, die sich durch ihre Lebhaftigkeit auszeichnen. In die Seitenwände eines Stereoskopes wurden nämlich zunächst zwei runde Oeffnungen geschnitten, die sich beim Hineinsehen deckten. Dann wurde vor den Spiegeln des Instrumentes, die unbelegt waren, ein Glimmerblatt von gleichmässiger Dicke eingeschaltet, und dasselbe durch zwei Nicol'sche Prismen betrachtet, deren Polarisationsebenen aufeinander senkrecht standen, so dass man beim Schliessen des linken Auges mittelst des rechten die complementäre Farbe von der sah, welche man beim Schliessen des rechten mit dem linken wahrnahm. Beim Sehen mit beiden Augen erschien nun die Oeffnung farblos (weiss), wonach also das Weiss aus den Complementärfarben auf den Netzhäuten beider Augen zum Vorschein kam.

Hierauf erfolgten in verschiedener Weise bestätigende Versuche von Prevost**), Seebeck***), von Regnault und Foucault†), und von Brücke††), nachdem schon früher Völckers†††) Bestätigendes gefunden hatte. Brücke sah nach einem Fenster durch complementär gefärbte Gläser, wo er dann seitlich die Farben getrennt an der Sparre erblickte, in der Mitte aber die Combinationsfarbe in der eigenthümlichen Beleuchtung, wie sie eine Londonsmoke Brille gewährt.

288. Man kann die hierher gehörigen Versuche in verschiedener Weise anstellen; entweder so, dass man durch zwei farbige Gläser (vor jedem Auge eins) nach einem ausgedehnten hellen

---

*) Monatsberichte der Berliner Akademie, 1841. S. 251. — Poggend. Ann. Bd. LXXI. S. 111. — S. auch Monatsb. d. Berl. Akad. 1850. S. 152.

**) Biblioth. universelle, 1843 (Novembre); Poggend. Ann. Bd. LXII. S. 548.

***) Poggend. Ann. Bd. LXVIII. S. 449.

†) Comptes rendus etc. T. XXVIII. p. 78.

††) Berichte d. kais. Akad. in Wien, 1853. S. 213; Poggend. Ann. Bd. XC. S. 606.

†††) Müller's Archiv. 1838. S. 6.

Grunde sieht, oder dass man verschiedenfarbige Scheiben in ein Stereoskop einsetzt und zur Coincidenz bringt, oder endlich, dass man, bei Geübtheit im Doppeltsehen, beide farbige Scheiben auf einem gleichfarbigen Grunde nebeneinander legt, aus jedem ein Doppelbild erzeugt und die beiden mittleren Bilder sich decken lässt. Hierbei wird sich das Phänomen des Wettstreites beider Farben geltend machen. Auch bei mir stellt sich dieses Phänomen sehr lebhaft ein; doch sehe ich bei gehöriger Fortsetzung des Versuches, z. B. mit den Doppelbildern, auch zuweilen die Resultirende beider Componenten auftauchen, manchmal sogar längere Zeit, meist jedoch nur momentan, und es scheint mir fast, als ob der Uebergang von einer Farbe zur anderen allemal durch ein wenigstens momentanes Auftreten der wirklichen Mischfarbe vermittelt wäre, was mit dem Resultate eines bald zu erwähnenden Versuches von Dove stimmen würde. Die von mir gesehene Mischfarbe entspricht fast ganz derjenigen, welche ich erhalte, wenn ich zwischen die beiden farbigen Scheiben eine dünne Glasplatte stelle, in der Art, dass das Spiegelbild der einen Scheibe für mich auf den Ort der anderen fällt. Das Vorwiegen der einen Farbe lässt sich durch Neigen des Glasplättchens oder durch Abändern der Entfernung des Auges beseitigen, so dass sich bald die entsprechende Mischfarbe herausstellt. Auf solche oder eine andere Weise, die mit der eben beschriebenen zu dem nämlichen Resultat führt, muss man sich wohl erst überzeugen, welche Mischfarbe man bei der Combination der beiden gegebenen Componenten zu erwarten hat. Dass übrigens auch dann, wenn man nur die eine Farbe (im obigen Versuche) zu sehen glaubt, dieselbe doch durch die andere etwas modificirt, und zwar meist ein wenig minder lebhaft erscheint, ist schon vielfach beobachtet worden, und kann man sich leicht davon überzeugen, wenn man abwechselnd das eine und andere Auge schliesst, was jedoch, wenn man das Phänomen durch Doppeltsehen bewirkt, nicht einmal nöthig ist, da sich hier die beiden Componenten seitlich von dem mittleren stereoskopischen Bilde zur Vergleichung darbieten.

289. Es kann wohl keinem Zweifel mehr unterliegen, dass zwei verschiedene Farben, die gleichzeitig beiden Augen, und zwar die eine dem einen, die andere dem anderen Auge, dargeboten werden, zu einer wirklichen Mischfarbe verschmelzen können.

So bemerkt auch Fechner*), dass er beim Blick in den Himmel mit einem dunkelrothen und dunkelgrünen Glase nach einigem Wettstreite fast immer ein ruhiges, richtiges Gesichtsfeld erhalte, das er nur grau nennen könne, und bei Richtung der Augen mit beiden Gläsern von da auf ein weisses Feld auf schwarzem Grunde erscheine ihm dasselbe gegen den schwarzen Grund schlechthin weiss.

Und Dove**) sagt, dass man in aller Strenge zeigen könne, dass, wenn man bei binocularem Sehen durch verschiedene gefärbte Gläser sich abwechselnd des Eindruckes des einen und des anderen Auges bewusst werde, der Durchgang stets durch eine wirkliche Combination erfolge. Das einfache Mittel hierzu besteht darin, durch die verschiedenen vor die beiden Augen gehaltenen Gläser ein Bild zu betrachten, welches in den beiden Farben der Gläser so ausgeführt ist, dass bei einem rothen und grünen Glase z. B. ein grünes Bild in einem rothen Felde entworfen ist, oder ein rothes Bild in einem grünen Felde; wo die Erscheinung am entschiedensten wird, wenn die farbigen Gläser so gewählt sind, dass wenn man durch eines allein sieht, die davon verschiedene Farbe des Bildes sich zu Schwarz verdunkelt, was mit Roth, Blau und Grün, nicht aber mit Gelb zu erreichen ist. — Wenn man nun mit einem rothen Ueberfangglase vor dem einen und einem tief blauen Glase vor dem anderen Auge das blaue Bild im rothen Felde betrachtet, sieht man zuerst das Bild schwarz auf rothem Grunde, so dass man sich also des Eindruckes des rothen Glases zuerst bewusst wird. „Plötzlich aber tritt das blaue Bild hervor und zugleich erscheint das Ganze so lebhaft glänzend, als wären die Farben in Porcellan oder Glas ausgeführt; besonders bei Roth und Grün ist das Alterniren der Erscheinung höchst charakteristisch. Zuerst sieht man das Grün dunkel im rothen Felde, dann beide glänzend, darauf verdunkelt sich das Roth, während man das Grün sieht, dann von Neuem beide glänzend, wobei jedesmal, so wie man nur eine Farbe sieht, diese vollkommen glanzlos erscheint. Der Glanz ist aber am auffallendsten, wenn man auf die Zeichnung senkrecht herabblickt.“ Da nun Dove, wie dieser weiter be-

*) Ueber einige Verhältnisse des binocularen Sehens (aus den Abhandl. der königl. Sächs. Ges. d. Wissensch. in Leipzig.) VII. 1860. S. 391.

**) Optische Studien, Fortsetzung der in der Farbenlehre enthaltenen. Berlin 1860. S. 6 f.

merkt, durch stereoskopische Versuche gezeigt hat, dass Glanz durch binoculare Combination einer schwarzen und weissen, oder zweier farbigen Flächen entsteht, so sind die hier mitgetheilten Versuche entscheidend für die Combination der Eindrücke unter den einfachen Bedingungen, unter welchen de Haldat zuerst seine Beobachtungen anstellte.

Aus dem Umstande, dass bei Allen, welche diese Versuche mit einem rothen und blauen Glase machten, der Eindruck des rothen Glases zuerst zum Bewusstsein kam, folgert Dove, dass wahrscheinlich das nicht achromatische Auge sich zuerst der grösseren Entfernung für das rothe Licht anpasse.

Uebrigens zeigen sich die beschriebenen Erscheinungen in gleicher Weise, wenn man die Gläser untereinander vor beiden Augen vertauscht, und können daher wohl nicht auf eine Ungleichheit beider Augen zurückgeführt werden.

290. Die Umstände, welche auf den Wettstreit der Sehfelder Einfluss üben können, sind folgende. Erstens eine ungleiche Entfernung beider farbigen Objecte, so dass man in Folge der wechselnden Adaption des Auges bald nur die eine, bald die andere Farbe deutlich sieht, wo dann die deutlich gesehene entschieden vorwiegen wird, fast bis zum Ausschluss der andern. Zweitens die Ungleichheit der Augen des Beobachters, die zu demselben Resultate führen kann; namentlich überwiegt hier die mit dem besseren Auge gesehene Farbe bedeutend. Drittens die ungleiche Lebhaftigkeit und Beleuchtung der farbigen Objecte, und endlich die vorzugsweise Richtung der Aufmerksamkeit auf die Erscheinung des einen oder andern Auges. In Rücksicht des letzteren Umstandes ergab sich, dass von den beiden farbigen Objecten bald das eine, bald das andere auftritt, je nachdem man die Aufmerksamkeit der einen oder andern Seite zuwendet, wie man unter anderem leicht findet, wenn man durch Doppeltsehen die Bilder zweier verschiedenfarbiger Scheiben zum Decken bringt, und nun die Aufmerksamkeit abwechselnd auf die Wahrnehmung des rechten und linken Auges richtet; es tritt dann meist die Farbe der betreffenden Seite hervor*). Da nun die Aufmerksamkeit wohl meist wäh-



*) s. hierüber Völckers: Müller's Archiv 1838. S. 61 u. 63. — Volkmann: Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes, Leipzig 1838. S. 97 ff.; — J. Müller: Handb. der Physiologie, Coblenz 1840. Bd. II. S. 387; — E.

rend des Versuches sich unwillkürlich bald nach dieser, bald nach jener Seite wendet, so kann auch ein vielfacher Farbenwechsel nicht ausbleiben. Wenn ich aber das willkürliche Spiel der Aufmerksamkeit längere Zeit fortsetze, finde ich bestätigt, was Fechner*) hervorhebt, dass nämlich der Wechsel der Farben träger erfolgt und nicht mehr ganz dem Wechsel der Aufmerksamkeit entspricht, und eben so auch, dass sich mitunter Wechsel im entgegengesetzten Sinne einstellen, wenn ich mich bestrebe, die Aufmerksamkeit längere Zeit auf einer Seite fixirt zu erhalten. Diese Resultate könnte man zunächst auf eine Ermüdung der Aufmerksamkeit und auf die anderweitigen dabei in Betracht kommenden Einflüsse zurückzuführen versuchen; indessen ist Fechner nach seinen weiteren Erfahrungen über dieses Phänomen zu der Annahme geneigt, dass die Richtung des Erfolges nicht wesentlich abhängig sei von der Richtung der Aufmerksamkeitsspannung, sondern dass vielmehr der Erfolg von einer Nebenwirkung der geänderten Richtung der Aufmerksamkeitsspannung abhänge. Jede neue Aufmerksamkeitsspannung begünstige nur überhaupt einen Wechsel in der Richtung des Erfolges, der aber ebenso gut in dem einen als in dem entgegengesetzten Sinne geschehen könne.

Fechner benutzte zu diesen Versuchen ein rothes und grünes Glas, und verfuhr so, dass er, wenn er Roth sehen wollte, während Grün erschien, die Intention oder Aufmerksamkeitsspannung auf das Auge mit dem rothen Glase wandte, und wenn er Grün sehen wollte, während Roth da war, die Intention auf das Auge mit dem grünen Glase verlegte. Dabei fand derselbe aber, dass, wenn eben das Roth noch vorherrschte, es ganz einerlei war, ob er die Intention im Auge mit dem rothen oder grünen Glase steigerte; der Wechsel zum Grün trat in einem wie im anderen Falle ein, und entsprechend der Wechsel zum Roth, wenn gerade Grün vorherrschte; „kurz, dass es überhaupt nur nöthig war,

---

H. Weber: Programmata collecta, p. 118; — Welcker: über Irradiation und einige andere Erscheinungen des Sehens, Giessen 1852. S. 107; — H. Meyer: Gräfe's Archiv für Ophthalmologie, Bd. II. S. 77; — Funke: Lehrb. der Physiologie, 1856. S. 875; — und über das Phänomen überhaupt auch Panum: physiologische Untersuch. S. 39 u. 92.

*) Ueber einige Verh. des binocul. Sehens, aus d. Abhandl. der Sächs. Ges. der Wissensch. VII, S. 392 ff., 401 ff.

wenn keine besondere Aufmerksamkeitsspannung da war, diese in einem Auge, beliebig welchem, oder auch beiden zugleich, hervorzurufen, ohne dass die eine Anordnung des Versuches in dieser Hinsicht den geringsten Vortheil vor der umgekehrten zu haben schien." So konnte Fechner den Wechsel im verkehrten Sinne eben so leicht und eben so oft hintereinander hervorrufen, als im rechten, d. h. das Grün durch Umsetzung der Spannung auf das Auge mit dem rothen Glase, das Roth durch Umsetzung derselben auf das Auge mit dem grünen Glase zur Präponderanz bringen, wenn die Verhältnisse danach waren. Auch vermochte ein kräftiges, momentanes Zusammenschlagen der Augenlider den Wechsel der Farben in ähnlicher Weise zu bewirken, als es mit einer neuen Aufmerksamkeitsspannung der Fall war.

Sonach lässt sich wohl allerdings nicht behaupten, dass man regelmässig und unter allen Umständen durch einen constanten Wechsel der Aufmerksamkeit einen constanten Wechsel des Phänomens erzeugen könne. Fechner*) vermuthet aber, dass dasselbe Beharrungsvermögen, das sich auch in den bekannten Erscheinungen der Nachdauer der Gesichtseindrücke kundgibt, den einmal präponderirenden Eindruck zu erhalten strebt, hiermit aber eine zunehmende Ermüdung für diesen Eindruck eintritt, vermöge deren endlich der andere Eindruck zum Uebergewichte kommt; und dass die Erneuerung oder der Wechsel der Aufmerksamkeitsspannung diesen Wechsel beschleunigt.

291. Allenfalls nun kann ich mir wohl denken, in welcher Weise beim Vorherrschen der einen Farbe und bei beginnender Ermüdung des sie herbeiführenden Organs die Richtung der Aufmerksamkeitsspannung auf das eine oder andere Auge zu demselben Resultat führt. Spannt sich nämlich die Aufmerksamkeit für das Auge, von welchem die gerade präponderirende Farbe *a* herrührt, so bewirkt dies nur eine um so raschere Ermüdung desselben und damit das entschiedene Auftreten der anderen Farbe *b*, die aber, wie es scheint, ebenso sicher auch dann zur Präponderanz gelangen muss, wenn sich die Aufmerksamkeit, bei eintretender Ermüdung für den Eindruck der Farbe *a*, bezüglich des anderen Auges steigert, das die Farbe *b* der Seele zuführt. Hierbei könnte sich die Aufmerksamkeit selbst in gewöhnlicher Weise



*) a. a. O. S. 405.

geltend machen, nur wäre ihr Effect hinsichtlich des einen Auges durch den Einfluss seiner Ermüdung modificirt; so dass sie bei Steigerung für dieses Auge gerade zu dem entgegengesetzten Resultat führte wie da, wo sie bei noch frischer Empfänglichkeit des Auges sich demselben zuwendet.

Fechner*) macht in Bezug auf das Wettstreitsphänomen die Bemerkung, dass die sinnliche Stärke, mit welcher ein Eindruck empfunden werde, von dem Grade der Aufmerksamkeit, mit welchem man ihn auffasse, wesentlich unabhängig erscheine, wenn die Aufmerksamkeit einmal hinreiche, den Eindruck ins Bewusstsein zu heben. Dies ist wohl richtig, wenn die Aufmerksamkeit eben hinreicht, den Eindruck ins Bewusstsein zu heben. Die willkürliche Aufmerksamkeit vermag, nach unserer Ansicht, im Grunde unmittelbar nichts über die Stärke der Sinnesempfindung; sie verschafft der letzteren gewissermassen nur freien Raum in der Seele, welchen die Sinnesempfindung dann im Verhältniss zur Stärke des sinnlichen Reizes benutzt. Jeder sinnliche Eindruck, den die Seele zu percipiren hat, trifft in dieser bereits vorhandene Zustände verschiedener Art, die auf die eindringende Sinnesempfindung hemmend wirken. Die willkürliche Aufmerksamkeit ändert nun das Hemmungsverhältniss zu Gunsten der Sinnesempfindung ab, so dass diese sich jetzt höher ins Bewusstsein heben kann und demgemäss auch mehr Klarheit gewinnt, als sonst, ohne Einfluss der Aufmerksamkeit, der Fall sein würde. Auch steht wohl ohne Zweifel die Begünstigung, welche eine Sinnesempfindung, als Vorstellung in der Seele, durch die Aufmerksamkeit erfährt, zur letzteren in einem bestimmten Verhältniss, dergestalt, dass die Höhe, bis zu welcher die Sinnesempfindung ins Bewusstsein erhoben wird, mit dem Grade der darauf gerichteten Aufmerksamkeit bis zu einer gewissen Grenze wächst, wobei jedoch die Stärke der Sinnesempfindung höchstens nur so gross werden kann, als sie durch die Stärke des sinnlichen Reizes oder durch die Intensität des physiologischen Processes im betreffenden Organe bedingt ist. Der Einfluss der Aufmerksamkeit verhindert namentlich die Zersplitterung der einzelnen Incremente, aus welchen binnen einer gewissen Zeit die im Bewusstsein erscheinende Empfindung resultirt, und zwar wird diese Zersplitterung durch eine Verminderung der Hemmung vermieden, welche die einzelnen Incremente bei ihrem

---

*) a. a. O. S. 405 f.

Auftreten in der Seele durch die anderen entgegenstehenden inneren Zustände erfahren. Allerdings spürt man nun, wie Fechner bemerkt, einen verschiedenen Effect in der Seele, wenn einmal bei constanter willkürlicher Aufmerksamkeit der Sinnesreiz, ein andermal bei constantem Sinnesreize die willkürliche Aufmerksamkeit verstärkt wird. Im ersten Falle lässt nämlich das durch den Willen bedingte Gefühl der Spannung, welches aus dem Andrange der die Aufmerksamkeit beeinträchtigenden anderweitigen Seelenzustände resultirt, in dem Augenblicke nach, wo der verstärkte Sinnesreiz sich geltend macht, während dasselbe im zweiten Falle wächst, wobei zu bedenken ist, dass mit stärkerer Spannung der Aufmerksamkeit nicht selten auch die ihr entgegenstehenden Kräfte zu stärkerem Widerstande gespannt werden, so dass die hochgespannte Aufmerksamkeit häufig genug zum vollen Rückzuge genöthigt wird, falls ihr nicht ein starkes Interesse, das seinen Sitz in einer Verbindung bestimmter Vorstellungen hat, zu Hilfe kommt.

292. Wenden wir uns nun nach diesen Betrachtungen über die Mischung der Farben insbesondere zu den Intensitätsverhältnissen der Licht- und Farbenempfindungen.

Die Intensität der Lichtempfindung ist innerhalb gewisser Grenzen zunächst physikalisch bedingt durch die Intensität des äusseren Lichtes, welche letztere im Sinne der Undulationstheorie die lebendige Kraft des schwingenden Aethertheilchens ist, und sowohl von der Schwingungsweite (Amplitude) als auch von der Oscillationsdauer abhängt. Der mathematische Ausdruck dafür ist $2\pi \frac{2a^2}{t^2}$, wo a die Schwingungsweite und t die Schwingungsdauer bezeichnet (S. 122). Und hiernach ergibt sich in Bezug auf die Intensität (Leuchtkraft) der verschiedenen Farbenstrahlen, dass bei gleicher Amplitude die Intensitäten im umgekehrten Verhältniss mit der Wellenlänge wachsen, d. h. je kleiner die Wellenlänge, desto grösser die Leuchtkraft; daher sich die Farben von grösster Leuchtkraft am violetten Ende des Sonnenspectrums befinden, und die Leuchtkraft von hier gegen das rothe Ende hin abnimmt. In Uebereinstimmung damit sind einige Wahrnehmungen von Dove *) und Grailich **), die sie gelegentlich in Gemäldegallerien machten,



*) Poggend. Ann. Bd. LXXXV. S. 397.

**) Ber. d. kais. Akad. in Wien. Bd. XIII. S. 251 f.

wo sich nämlich zeigte, dass bei zunehmender Dunkelheit zuerst die rothen Farben verschwanden, während die blauen noch merklich sichtbar blieben, bis endlich auch diese sich verloren, wie denn auch, dem entsprechend, Helmholtz bei seinen Untersuchungen über die Mischung der Spectralfarben fand, dass von zwei gleich hell erscheinenden Farben bei Verminderung des weissen Lichtes, aus dem sie ausgesondert werden, die stärker brechbare heller erscheint als die andere minder brechbare (S. 95). Leicht überzeugt man sich von dem zuvor Gesagten des Abends bei einbrechender und zunehmender Dämmerung, wo die blauen Farben sich noch bedeutend geltend machen, während die rothen schon vollkommen dunkel erscheinen. Dove erläutert dies im Sinne der Undulationstheorie, indem er darauf hinweist, dass bei der blauen Farbe in Folge der grossen Anzahl und Schnelligkeit der sie veranlassenden Schwingungen eine Summirung der Eindrücke auf der Retina stattfinde, wogegen die langsamer erfolgenden Schwingungen der rothen Strahlen sich nicht mehr zu einem Gesammteindruck vereinigen könnten. Dabei erinnert er an analoge Verhältnisse im Gebiete der Töne, wo gleichfalls die schwächsten auf das Organ wirkenden Bewegungen nicht mehr einzeln empfunden werden, wohl aber dann, wenn sie sich schnell gleichmässig wiederholen. So müssen die Saiten des Contrabasses, um vernommen zu werden, weiter schwingen als die der Violine; und aus demselben Grunde, bemerkt Dove, muss man, wenn man ohne grosse Anstrengung gehört werden will, in höherem Tone sprechen, und eben darum dringt die schrille Stimme der Bootspfeife durch das Brausen der Wogen und das Geheul des Windes hindurch, während die tiefe durch das Sprachrohr verstärkte Stimme des Seemannes im Sturme verhallt. „Die volle Gleichartigkeit der Schwingungen bewirkt aber das Summiren der Eindrücke am vollständigsten, indem die durch ungleiche Schwingungsdauer bewirkten Interferenzen dann wegfallen. Diese Gleichmässigkeit bewirkt bei den Tönen die Reinheit, bei den Farben die Homogenität. Das Blau verhält sich aber zum Roth wie ein höherer Ton zu einem tieferen. Da nun bei schwächer werdendem Tone die Grenze der Wahrnehmbarkeit tieferer Töne abnimmt, so ist es vollkommen dem entsprechend, dass bei abnehmender Helligkeit die Grenze der Wahrnehmung des Roth sich ebenfalls verengert. Die rothe Farbe wird daher bei schwacher Beleuchtung nicht mehr gesehen werden, wäh-

rend die grosse Anzahl der Schwingungen bei blauem Lichte dessen Wahrnehmbarkeit länger erhält."

293. Schreibt man demgemäss den Farben am violetten Ende des Spectrums unter sonst gleichen Umständen eine grössere Leuchtkraft zu als denen gegen das rothe Ende hin, so ist es, um hier eine Verwirrung in den Begriffen zu vermeiden, wie mir scheint, unerlässlich, mit Grailich*) zwischen photometrischer Intensität (Leuchtkraft, Helligkeit) und chromatischer Intensität (Lebhaftigkeit, Energie der Färbung) zu unterscheiden. Die photometrische Intensität ist bei homogenen Strahlen, wo die Wellenlänge constant ist, durch das Quadrat der Schwingungsweite bedingt, in Hinsicht auf verschiedene Farben aber auch noch durch die Wellenlänge. Dagegen ist die chromatische Intensität (der Farbenreiz) vorzugsweise oder lediglich bedingt durch die Wellenlänge oder Schwingungsdauer, und um so grösser, je länger ein Aethertheilchen und das von der Welle afficirte Netzhautelement aus seiner Gleichgewichtslage entfernt bleibt; daher dieselbe vom violetten gegen das rothe Ende des Spectrums hin zunimmt. Da aber das Auge, wie Grailich bemerkt, die beiden Momente des Lichtreizes (Leuchtkraft) und des Farbenreizes nicht unterscheidet, so wird es die rothen Töne auch für heller, die blauen für lichtärmer nehmen als es beide sind. Und in Bezug hierauf hebt Grailich einen Mangel der Fraunhofer'schen Intensitätsmessungen der Spectralfarben (§. 85) hervor und folgert aus seinen Untersuchungen, dass die Leuchtkraft im Spectrum am blauen Ende viel stärker ist, als es diese Messungen angeben.

Sind nun im Spectrum die Schwingungsweiten der blauen Strahlen gleich denen der rothen, so wird die Leuchtkraft des Blau stärker sein, wenn auch der Farbenreiz des Roth beträchtlich im Uebergewicht ist und daher auch die Lichtstärke desselben scheinbar präponderirt. Bei allmäliger Abnahme der Gesammtbeleuchtung wird aber das Roth eher die Grenze der zur Sichtbarkeit nothwendigen Intensität erreichen, und das Blau wegen seiner geringeren Wellenlänge, d. h. wegen seiner grösseren Schwingungszahl, noch einige Zeit hindurch sichtbar bleiben, während welcher kein Roth wahrzunehmen ist. In demselben Sinne erklärt sich auch nach

*) a. a. O. S. 272 f.

Grailich eine Beobachtung Pouillet's*) über das Beleuchtungsvermögen verschieden gefärbter Substanzen, wo sich fand, dass das glänzendste Roth eines Wollen- oder Baumwollenstoffes ein geringeres Beleuchtungsvermögen besitzt als das dunkelste Blau, und dieses wieder ein geringeres als Grau, das nur als ein helleres Schwarz zu betrachten war.

294. Auch in Hinsicht auf die ästhetische Wirkung der Farben lassen sich aus den hervorgehobenen Principien der Undulationstheorie einige Folgerungen ziehen, und zwar etwa in dem Sinne, wie es von Grailich**) angedeutet ist***). So ist die schattige, kalte, lichtreizende Beschaffenheit des Blau durch den Umstand bedingt, dass die kürzeren Aetherwellen, die dasselbe veranlassen, wegen der raschen Oscillation der zugehörigen Aethertheilchen den von ihnen afficirten Netzhautelementen die öftere Wiederkehr in die Ruhelage gestatten, während die Lichtarmuth desselben von der geringen Amplitude herrührt. Das Blau ist also am meisten dem Schatten, der Dunkelheit und Nacht verwandt, die der Netzhaut Ruhe gewähren und psychisch wie jeder dauernde Mangel an äusserer Anregung wirken: in sich versenkend, dem Leben abkehrend, was freilich dem Blau nicht so, wie dem Schwarz, vollständig gelingt, da es doch auf einer wirklichen, wenngleich schwachen, Anregung der Lebensthätigkeit beruht, indem mit der öfteren Wiederkehr in die Ruhelage auch eine eben so häufige Entfernung aus derselben verbunden ist; daher Göthe das Blau, nicht unpassend, ein reizend Nichts nennen konnte. Dagegen ist im feurigen, vollen Roth, weil hier, wegen der grösseren Schwingungsdauer, die Retinaelemente am längsten aus ihrer Ruhelage entfernt bleiben, der Reiz der dauerndste und die Lebensregung in der Retina (und dem Centralorgan) am mächtigsten, daher seine Wirkung aufregend und erhebend, doch auch leicht, wenn noch eine bedeutende Amplitude hinzukommt, gewaltsam, schreiend und selbst unerträglich. Zwischen dem schattenverwandten Blau und dem leicht überreizenden Roth stehen im Sonnenspectrum, dem Farbenreize nach, die gelben Farbentöne, die bei den grössten

*) Compt. rend. T. XXXV. p. 373; — Poggend. Ann. Bd. LXXXVII. S. 496.

**) a. a. O. S. 260.

***) s. auch W. F. Volkmann, Grundriss der Psychologie nach genetischer Methode etc. Halle, 1856. S. 64f.; und Physikal. Lexicon, beg. von Marbach, fortg. von Cornelius, Bd. V, S. 935f.

Amplituden auch den grössten Antheil an der Beleuchtung haben. Das Gelb wirkt viel weniger gewaltsam als das Roth, aber doch noch zur Genüge anregend: klar, warm und harmonisch. Am weitesten entfernt jedoch von den Extremen der Wellenlänge (oder der Schwingungsdauer) erscheint das Grün; von Tiek die mütterliche Farbe und von Oersted die Farbe des Vertrauens genannt.

Sehr wahrscheinlich besitzt nun das von aussen ungereizte Sehorgan schon eine Menge von Reizzuständen, vermöge deren es sich in einer gewissen Stimmung befindet, welche durch verschiedene Aetherwellen auf eigenthümliche Weise modificirt wird, womit denn auch das Auftreten einer bestimmten Farbenempfindung in nächster Beziehung steht. Jene Stimmung kann aber bei verschiedenen Personen verschiedener Art sein, und hiermit mag der ungleiche Grad von Annehmlichkeit oder Unannehmlichkeit, der mit den einzelnen Farbenempfindungen bei verschiedenen Personen verbunden ist, im Zusammenhange stehen, und die Vorliebe für die einen oder anderen Farbentöne veranlassen. Wie abweichend auch in dieser Hinsicht der Geschmack ist, so gross ist doch im Allgemeinen, unter Voraussetzung normaler Augen, die Uebereinstimmung in den Urtheilen des Beifalls und Missfallens, welche über die Zusammenstellungen verschiedener Farben gefällt werden; daher wohl für das gegenseitige Verhalten der Farben gewisse constante Gesetze gelten müssen, die wahrscheinlich grösstentheils durch die den verschiedenen Aetherwellen zugehörigen Schwingungszahlen bedingt sind.

Inzwischen ist bei der Gruppirung verschiedener Farben, wegen der ungleichen chromatischen Intensität der verschiedenen homogenen Aetherwellen, auch noch die Ausdehnung bedeutsam, worin sich eine gewisse Farbe neben anderen darbietet. So macht, um ein bekanntes Beispiel anzuführen, eine blaue Draperie mit goldorangenen Fransen einen wohlgefälligen Eindruck, während umgekehrt eine ausgedehnte orangene Fläche mit blauer Einfassung eher missfallen würde. Daher scheint die Regel zu gelten, dass in einer Zusammenstellung verschiedener Farben von sehr ungleichem Reize, wenn dieselbe gefallen soll, die Farbe von geringster chromatischer Intensität die grösste Ausdehnung haben muss, also in einer Zusammenstellung von Blau, Roth, Gelb das Blau.

295. Die Intensität der Lichtempfindung zeigt sich auch abhängig von der Grösse der vom Lichte getroffenen Retinafläche, und zwar so, dass sie mit der letzteren wächst; daher wir hier ein analoges Verhältniss haben wie bei dem Gefühlssinn der Haut, wo das Gefühl der Wärme sich steigert mit der Grösse der von der Wärme erregten Hautfläche, also mit der Anzahl der afficirten Nervenfasern. So wird die Lichtempfindung, wenn beide Retinaflächen vom Lichte getroffen werden, intensiver ausfallen, als wenn wir nur ein Auge gebrauchen, was sich schon aus dem Umstande ergibt, dass wir, ohne Gefahr der Blendung, wohl mit einem Auge, nicht aber mit beiden Augen zugleich, ein sehr grelles Licht betrachten können. Auch sehen wir mit beiden Augen die Objecte wirklich heller als mit einem Auge, wie man findet, wenn man ein Stück weisses Papier in der Art betrachtet, dass die eine Hälfte desselben durch einen undurchsichtigen Schirm dem einen Auge verdeckt ist, wo dann der mit beiden Augen gesehene Theil merklich heller als der andere erscheint, der nur in das eine Auge Lichtstrahlen fallen lässt. Dasselbe ergibt sich, wenn man zwei weisse Papierblätter in ein Stereoskop einsetzt, und nun abwechselnd bald mit einem Auge, bald mit beiden Augen hineinsieht.

Verdeckt man, während man eine weisse Fläche betrachtet oder in den hellen Himmel sieht, ein Auge, so gewahrt man bei gehöriger Aufmerksamkeit eine leichte Beschattung des hellen Gesichtsfeldes, die jedoch sehr bald wieder verschwindet. Die meisten Personen werden dies wohl bestätigt finden. Unter 30 Personen, die Fechner diesen Versuch anstellen liess, gab es vier, die nichts davon wahrnehmen konnten. Bei erheblicher Ungleichheit beider Augen wird das Gesichtsfeld durch Verdecken des einen Auges merklich dunkler als durch Verdecken des anderen Auges, wie dies bei mir selbst der Fall ist, indem der Verschluss des linken Auges die Verdunklung merklich grösser werden lässt, als umgekehrt. Auch finde ich bestätigt, was Fechner von sich selbst anführt, dass nämlich der leichten Beschattung des Gesichtsfeldes in Folge der Pupillenerweiterung, sehr schnell eine kleine Wiedererhellung folgt, namentlich wenn man statt des Himmels ein weisses begrenztes Feld auf dunklem Grunde betrachtet, und zwar manchmal deutlicher als andre Male.

Eine nahe liegende Erklärung für die Thatsache, dass der

Helligkeitsunterschied hier, beim Sehen mit einem Auge und mit beiden Augen, so gering ist, bietet sich in der Pupillenerweiterung dar, indem der Pupillendurchmesser des offenen Auges so lange zunimmt, bis die Basis des einen Lichtkegels nahe einen Flächeninhalt hat, welcher der Summe beider Grundflächen beim binocularen Sehen entspricht*). Indess glaubt Fechner nicht, dass hiervon der ganze Erfolg abhängen könne, wenngleich die Pupillenerweiterung beim Verdecken des einen Auges ohne Zweifel dazu beitrage, den verminderten Lichtzutritt zu compensiren.

296. Bei dieser Gelegenheit wollen wir nun auf ein Verhältniss hinweisen, das sich ebensowohl in Rücksicht der Helligkeits- als Farbenempfindung äussert, und von Fechner**) als ein antagonistisches bezeichnet wird, insofern es sich, nach demselben, in ersterer Beziehung durch gegenseitige Beschränkung der Helligkeitsempfindung, in letzterer durch Hervorrufung complementärer Farbenstimmungen kundgeben soll.

In Rücksicht der Helligkeitsempfindung stellt Fechner folgenden Satz auf: „Wenn zum Licht im einen Auge Licht im anderen Auge hinzutritt, kann je nach den Intensitätsverhältnissen der Lichter die Helligkeit, die das eine Licht erzeugt, durch den Zutritt des anderen ebensogut abnehmen als wachsen."

Um den hierher gehörigen Grundversuch, den Fechner den paradoxen Versuch nennt, anzustellen, nehme man, während man mit beiden Augen in den Himmel oder auf eine weisse Thür oder Wand sieht, vor ein Auge *B* ein stark verdunkelndes Mittel, indess das andere *A* freibleibt. Als verdunkelndes Mittel dient am besten ein graues Glas, das wenigstens die Hälfte Licht absorbirt, oder in Ermangelung desselben ein mit Rauch angelaufenes oder endlich die Combination zweier complementär gefärbter Gläser, falls sie nur nicht alles Licht ausschliessen. Das beiden Augen gemeinsame Gesichtsfeld erscheint dann, bei Vornahme des dunklen Glases vor das Auge *B*, der Erwartung gemäss, dunkler, was natürlich noch mehr der Fall ist, wenn man das freie Auge *A* schliesst. Verdeckt oder schliesst man aber, statt des Auges *A*, das Auge *B* mit dem vorgesetzten dunklen Glase, während *A* offen

*) s. Dubrunfaut: Gazette medicale de Paris 1856. Januar.

**) Ueber einige Verhältnisse des binocularen Sehens, Leipzig, 1856; aus d. Abhandl. d. königl. Sächs. Ges. d. Wissensch. VII. S. 416 ff.

bleibt, so erhellt sich das Gesichtsfeld sehr merklich, und zwar um so mehr, je mehr die Verdunklung bei Vornahme des Glases betrug.

„Sonach bewirkt vollständige Verdunklung eines bis zu einem gewissen Grade verdunkelten Auges bei unverdunkeltem anderen Auge eine Erhellung des gemeinsamen Gesichtsfeldes."

Beseitigt man die Verdunklung oder den Schluss des Auges *B* wieder, ohne das graue Glas zu entfernen, lässt also wieder etwas, doch nicht das volle Licht in dieses Auge zu, so verdunkelt sich das Gesichtsfeld wieder eben so sehr.

„Zulassung des Lichtes bis zu gewissen Grenzen in einem anfangs ganz verdunkelten Auge bei unverdunkeltem anderen Auge bewirkt also eine Verdunklung des gemeinsamen Gesichtsfeldes."

Der Erfolg des beschriebenen Versuches ist, wie Fechner bemerkt, durch Wiederholung von Seiten vieler Personen sicher gestellt. Verschiedene Modifikationen desselben s. am citirten Orte.

Sind beide Augen frei und auf eine helle Fläche gerichtet, so wird beim Schlusse des einen, wie wir oben (S. 446) anführten, zwar das Gesichtsfeld etwas beschattet, aber doch nicht so sehr, wie es der Fall sein würde, wenn nicht in Folge der Pupillenerweiterung eine Compensation des verminderten Lichtzutrittes stattfände. Jedenfalls ist wohl die Pupillenerweiterung hierbei nicht ohne Einfluss. So ist es nun möglich und wahrscheinlich, dass sich dieser Einfluss auch da geltend macht, wo das durch das vorgehaltene graue Glas verdunkelte Auge völlig geschlossen wird, während das andere offen bleibt, woraus sich freilich auch nur eine Compensation des verminderten Lichtzutrittes, nicht aber die auffällige Erhellung des Gesichtsfeldes erklären würde. Doch könnte noch ein anderer Umstand hinzukommen. Es ist mir nämlich nicht unwahrscheinlich, dass die Accommodationsverhältnisse beider Augen durch das dem einen Auge vorgehaltene Glas eine Störung erfahren, die beseitigt wird, wenn man dieses Auge völlig verdeckt oder schliesst; daher nun eine grössere Concentration des Lichtes auf der Netzhaut des offenen Auges stattfindet.

Indessen glaubt sich Fechner*) durch folgenden Versuch überzeugt zu haben, dass der Erfolg des betreffenden Versuches nicht von einer Pupillenveränderung abhängt. „Man sieht mit bei-

---

*) a. a. O. S. 426.

den Augen in den Himmel, mit dem einen *A* aber durch ein Nadelloch in einem Kartenblatte, mit dem anderen *B* durch ein Glas, welches dunkel genug ist, um bei dem Doppelbildsversuche mit einem kleinen weissen Felde ein dunkleres Bild zu geben als das Loch im Kartenblatte. Nun schliesst und öffnet man das Auge hinter dem Glase abwechselnd, oder lässt das Glas abwechselnd verdecken und freigeben; dann zeigt sich der Erfolg der Erhellung und Verdunklung des Gesichtsfeldes wie beim gewöhnlichen paradoxen Versuche, ungeachtet hier der Einflusss einer Pupillenänderung ausgeschlossen ist.“ Stellte Fechner den Versuch mit einem seiner helleren Gläser an, welches eine hellere Componente im Doppelbildsversuche gab, als das Nadelloch, so trat vielmehr Verdunkelung bei Verdeckung und Erhellung bei Freilassung des mit dem Glase versehenen Auges ein, auch wenn das Glas dunkel genug war, um ohne Zuziehung des Kartenblattes den besprochenen Erfolg zu geben.

Dennoch ist es fraglich, ob bei diesem Versuche (mit der Oeffnung im Kartenblatt) der Einfluss der Pupillenänderung gänzlich ausgeschlossen ist; wenigstens ist die letztere selbst nicht beseitigt (s. S. 417), auch nicht bei Anwendung des Glases vor dem Auge *B*.

297. Mit zwei Auffassungen des in Rede stehenden Phänomens, denen Fechner*) namentlich begegnete, konnte sich derselbe nicht befreunden. So soll nach der einen Auffassung bei Vornahme des grauen Glases vor das Auge *B* sich die Dunkelheit, die dieses Glas bewirkt, mit der Helligkeit des Auges *A* zusammensetzen, während bei gänzlicher Verdeckung des dunklen Auges *B* mit dem hellen wieder allein gesehen werde. Wie in dem Falle, wo beide Netzhäute von ungleichfarbiger Beleuchtung afficirt werden, der Eindruck der einen Farbe durch die andere eine Modification erfahre, so zeige sich bei Vornahme eines dunklen Glases der Eindruck der grösseren Helligkeit im einen Auge durch den Eindruck der geringeren im anderen modificirt, und es gehe daraus vielmehr ein Mittleres zwischen Hell und Dunkel, als eine Zufügung der geringeren Helligkeit im einen zur grösseren Helligkeit im anderen Auge hervor.

Bedeutsamer als diese Ansicht scheint nun allerdings die an-

*) a. a. O. S. 460 ff.

dere zu sein, welche sich dahin ausspricht, dass, wenn zum Licht im hellen Auge *A* Licht im dunklen *B* komme, der Totaleffect der Empfindung sich deshalb mindere, weil die Aufmerksamkeit dadurch veranlasst werde, sich zu theilen, statt dass sie sich, wenn man das Auge *B* schliesse, auf das offene concentriren könne. Freilich fragt Fechner, warum die Theilung der Aufmerksamkeit blos bis zu gewissen Grenzen die Vermehruug des Lichtreizes überwiege, und was berechtigen könne, der Theilung der Aufmerksamkeit zwischen zwei Netzhäuten einen Erfolg beizulegen, den sie bei Theilung zwischen verschiedenen Stellen derselben Netzhaut nicht zu äussern vermöge. Indessen ist es, wie mir scheint, kaum anders zu erwarten, als dass nur bis zu gewissen Grenzen, wenn von neuem Licht in das vorher dunkle Auge tritt, wegen Theilung der Aufmerksamkeit eine Verdunklung des Gesichtsfeldes eintritt, indem bei weiterem Wachsthum des Lichtreizes im Auge *B* der Anlass zu einer Theilung der Aufmerksamkeit immer geringer wird. Sobald sich das verdeckte oder geschlossene Auge wieder öffnet, wendet sich ihm die Aufmerksamkeit unwillkürlich zu, indem es sich für das durch das vorgehaltene Glas eingedrungene Licht nach Thunlichkeit einzurichten strebt, wodurch das bisher wohl adaptirte offene und freie Auge, hinsichtlich seiner Adaption, eine Beeinträchtigung erfährt, die verschwindet, wenn das andere Auge wieder völlig geschlossen oder verdeckt wird. Daher in jenem Falle eine Verdunklung, in diesem eine Erhellung des Gesichtsfeldes. So wird durch das dem einen Auge vorgehaltene Glas eine Ungleichheit beider Augen, und zwar, wie mir scheint, bezüglich der Adaption für das einfallende Licht, gesetzt, wodurch es allerdings geschehen kann, dass der Hinzutritt des Lichtes auf der zweiten Netzhaut zu dem Lichte auf der ersten bis zu einer gewissen Grenze eine beschränkende Wirkuug auf die Empfindung des Lichtes ausübt. Lediglich durch die Aufmerksamkeit möchte die Erscheinung freilich nicht erklärbar sein.

Fechner bezeichnet das hier vorliegende factische Verhältniss, ohne eine eigentliche Erklärung des Phänomens versuchen zu wollen, als ein antagonistisches, indem er hervorhebt, dass die Theilung des Lichtes auf beiden Netzhäuten einen anderen Erfolg haben müsse, als die Häufung auf einer und derselben Netzhaut. Gehe man in beiden Augen von völliger Dunkelheit aus, so wachse die Helligkeit continuirlich, in welchem beider Augen man auch

das Licht einseitig wachsen lassen möge. Während das Wachsthum des Lichtreizes auf jeder Netzhaut an sich nur zur Verstärkung der Empfindung wirken könne, beschränke das gleichzeitige Dasein des Lichtreizes auf beiden Netzhäuten dessen Leistung für die Empfindung wechselseits, dergestalt, dass diese beschränkende Wirkung bis zu gewissen Grenzen jene Steigerung überwiege, über gewisse Grenzen hinaus aber davon überboten werde.

Das besprochene Verhältniss gilt übrigens nach Fechner*) eben so wohl für disparate (differente) als correspondirende Stellen beider Netzhäute. Werden zwei differente Stellen beider Netzhäute mit Licht gereizt, so erscheint das Licht auf jeder insbesondere heller oder minder hell, je nachdem das Licht auf der anderen ausgeschlossen oder wieder zugelassen wird. Am augenfälligsten ist der Erfolg, wenn beide differente Stellen mit ungleicher Intensität gereizt sind, und das stärker gereizte Auge abwechselnd geschlossen und geöffnet wird.

298. In Rücksicht der Farbenempfindung bezieht Fechner**) noch folgende von ihm hervorgehobene Erscheinungen auf das sog. antagonistische Verhältniss zwischen beiden Netzhäuten, das sich hier durch Hervorrufung complementärer Farbenstimmungen aussprechen soll.

1) Wenn bei übrigens dunklem Grunde beider Augen eine Netzhaut *B* an einer Stelle farbig gereizt ist, erscheint eine mit hinreichend abgedämpftem weissen Licht gereizte differente der anderen Netzhaut *A* mit der Complementärfarbe dazu; eine Erscheinung, die wir späterhin auch in Bezug auf zwei differente Stellen einer Netzhaut in ähnlicher Weise wiederfinden werden.

2) Wenn eine Netzhaut *B* mittelst Blickes in den Himmel durch ein Farbenglas eine gewisse Zeit hindurch mit einer gewissen Farbe gereizt war, indess zugleich die andere entweder α) dunkel oder β) mit weissem Licht gereizt war, so hinterbleibt nach der Reizung eine zum Farbenglase complementäre subjective Farbenstimmung auf der Netzhaut *B*, eine mit dem Glase gleichfarbige Stimmung auf der Netzhaut *A*, welche Farbenstimmungen durch abwechselnden Schluss des einen und anderen Auges abwechselnd, durch Erzeugung des Doppelbildes eines weissen Objects auf schwar-

*) a. a. O. S. 463 ff.
**) a. a. O. S. 560.

zem Grunde gleichzeitig in Absonderung voneinander zur Geltung gebracht werden können.

Mit subjectiver Farbenstimmung ist hier von Fechner jener factische Zustand der Empfänglichkeit des Auges bezeichnet, vermöge dessen objectives Weiss farbig erscheint, z. B. grün, wenn man einen rothen Fleck eine Zeit lang angesehen hat, wo dann das Auge eine zum Roth complementäre subjective grüne Farbenstimmung zeigt.

Von den vorhin erwähnten gleichzeitig zur Geltung gebrachten Nachfarben steht nun die Gleichfarbe im Auge *A* im Allgemeinen minder lange als die Complementärfarbe im Auge *B*, wenn, nach Methode α, während der Farbenreizung von *B* das Auge *A* geschlossen war; was, wie Fechner bemerkt, für eine stärkere Entwickelung der Complementärfarbe als Gleichfarbe spricht. „Wird aber (nach Methode β) während der Farbenreizung von *B* das Auge *A* offen gehalten, so kann dieses Uebergewicht der Dauer der Complementärfarbe über die Gleichfarbe verschwinden, wovon der Grund entweder darin gesucht werden kann, dass die Gleichfarbe sich in einem für alle Farbenstrahlen ermüdeten Auge verhältnissmässig stärker entwickelt, als in einem gar nicht ermüdeten, oder wahrscheinlicher darin, dass die Gleichfarbe in dem vermöge der Ermüdung für alle Farbenstrahlen dunkler erscheinenden Weiss leichter zur Geltung kommt."

2) Wenn beide Augen mit zueinander complementären Farben gereizt waren, so hinterbleiben in ihnen subjective complementäre Farbenstimmungen, die durch geeignete Massnahmen beliebig zu Weiss combinirt, oder abgesondert zur Geltung gebracht werden können; worüber man nach Fechner folgenden Versuch anstellen kann. Man hält zwei zueinander complementär gefärbte Gläser, das eine vor das eine, das andere vor das andere Auge, und sieht damit eine Zeit lang, — nach der individuellen Beschaffenheit der Augen mehr oder minder lange, — in den Himmel, wodurch jedes Auge die zu seinem Glase complementäre Farbenstimmung gewinnt. Hierauf richtet man, nach Weglegen der Gläser oder auch während man die Gläser noch vor den Augen hat, den Blick auf ein weisses Feld auf schwarzem Grunde, fixirt dasselbe einfach mit beiden Augen und zieht hiernach, falls es nicht schon geschehen, die Gläser von den Augen hinweg. Im Falle nun beide Augen mit derselben Farbe gereizt wären, würde man

das Weiss mit der Complementärfarbe zu jener Farbe sehen. Unter den obwaltenden Umständen sieht man aber beim Wegziehen der Gläser, entweder sofort oder nach einem kurzen schnell vorübergehenden Schein der einen oder anderen Farbe oder fleckweisem Gemenge derselben, alsbald das Feld rein weiss. Verdeckt man jedoch blos das eine und andere Auge abwechselnd, so tritt an dem weissen Felde abwechselnd die eine und andere Complementärfarbe zu dem Glase, was vor das betreffende Auge gehalten war, hervor, wogegen wieder sofort Weiss erscheint, wenn man beide Augen zugleich öffnet. Und dieser Wechsel lässt sich beliebig wiederholen, bis die subjectiven Farbenstimmungen erloschen sind. Aber auch zugleich lassen sich die beiden Farben zur Geltung bringen, wenn man ein Doppelbild des weissen Objects erzeugt, das sich dann in zwei complementäre Bilder zerlegt, die beim Zusammenschieben wieder in Weiss verfliessen. Dagegen bleibt, wenn man, während beide Bilder gesehen werden, das eine Auge verdeckt, das mit dem andern Auge gesehene in seiner Farbe stehen. — Bleibt der Blick, nach Beseitigung der Gläser, in den Himmel gerichtet, anstatt ihn auf ein begränztes weisses Feld zu richten; so erscheint, wenn man die Augen abwechselnd verdeckt, abwechselnd das ganze Gesichtsfeld mit der jedesmaligen Complementärfarbe erfüllt.

So kann also, nach dem Vorstehenden, durch die Combination subjectiv complementärer Farben ebenfalls Weiss entstehen.

In Bezug auf die Dauer der subjectiven Farbenstimmungen ergab sich noch, „dass die complementären Nachfarben, die man nach complementärer Farbenreizung beider Augen abgesondert oder gleichzeitig an Weiss zur Geltung bringt, eine viel grössere Dauer haben, als die einzige Nachfarbe, die nach Reizung beider Augen mit einer und derselben Farbe zur Geltung gebracht wird. Auch wird die Dauer der complementären Nachfarben, sei es, dass sie durch zweiseitige oder einseitige Farbenreizung hervorgerufen werden, durch ihr gleichzeitiges Erscheinen sehr befördert, indess eine jede schneller vergeht, wenn man sie ohne die andere allein zur Geltung bringen und darin erhalten will; nachdem sie aber vergangen ist, durch Geltendmachung der anderen wieder belebt werden kann.“

299. Die beleuchteten Oberflächen verschiedener Körper bieten dem Gesichtssinn den Unterschied des Matten und Glänzenden

dar; und es ist bekannt, dass namentlich glatte, wohlpolirte Flächen im reflectirten Lichte stark glänzen. Doch können verschiedene Körper von gleicher Politur, je nach ihrem eigenthümlichen Reflexionsvermögen, Glanz von verschiedener Intensität zeigen. Das Reflexionsvermögen ist aber um so bedeutender, je ungleicher die Brechungscoefficienten eines Körpers und des umgebenden Mediums sind. So zeigen Mineralien Glasglanz, Diamantglanz oder Metallglanz, je nachdem das Brechungsverhältniss zwischen 1,3 und 2,0, zwischen 2,0 und 2,6, oder zwischen 2,6 und 5,0 liegt.

Inzwischen hat man bezüglich des Glanzes zwischen zerstreutem und regelmässig reflectirtem Lichte zu unterscheiden (S. 18). Der Betrag der regelmässigen Reflexion ist im Allgemeinen bedingt durch die Glätte und Politur der Oberfläche, die zerstreuende Reflexion aber, die mit der Farbe eines Körpers in nächster Beziehung steht (S. 104), ist um so grösser, je unebener und rauher die Oberfläche ist, wobei zu bedenken, dass selbst die beste Spiegelfläche nicht ganz frei von Unebenheiten ist.

Man könnte sich nun etwa mit Oersted*) vorstellen, dass der Glanz vorzugsweise von dem Uebergewichte der regelmässigen Reflexion über die zerstreuende herrühre, da die Veränderungen an der Oberfläche der Körper, welche den Glanz erhöhen, die zerstreuende Reflexion vermindern, und umgekehrt. Allein hiermit stimmen keineswegs alle Erscheinungen, die durch Veränderungen der Oberfläche, insbesondere durch Politur, bewirkt werden.

Oersted selbst führt unter anderem folgendes Thatsächliche an. Viele Metalle, wie Eisen, Platin, Silber, Blei und Arsenik, sind im fein zertheilten Zustande schwarz oder grau, andere, wie Gold und Kupfer, farbig; jedes dieser Metalle erhält aber durch Druck und eine gewisse Zusammenstellung der Theile seinen bekannten metallischen Glanz und seine Farbe. Beim Stahle verschwindet jedoch die eigenthümliche Farbe durch Politur so sehr, dass die Fläche fast schwarz erscheint. Rothes Eisenoxyd bekommt polirt mit dem Glanze einen stahlgrauen Schein und zeigt um so weniger Röthe, je vollkommener die Politur wird. Zinnober zeigt im blanken Zustande eine Farbe, welche sich mehr der des Bleis oder der des Quecksilbers nähert, indess mit weniger lebhaftem

*) Poggend. Ann. Bd. LX. S. 49.

Glanze. Indigo erhält durch Politur Kupferglanz, und Berlinerblau einen eigenthümlich dunkelblauen Glanz.

300. Von besonderem Interesse in Bezug auf die Entstehung des Glanzes sind einige stereoskopische Versuche Dove's*), aus denen zunächst hervorgeht, dass Glanz durch binoculare Combination einer schwarzen und weissen, oder zweier farbiger Flächen entsteht.

Man zeichnet die Projectionen, etwa einer abgestumpften Pyramide für das eine Auge mit weissen Linien auf matt schwarzen Grund, für das andere Auge mit schwarzen Linien auf weissen Grund. Bei stereoskopischer Combination erscheint dann das Relief von grauen Flächen begrenzt, die wie Graphit glänzen, und zeigt Kanten, die ihrer ganzen Länge nach aus blendend weissen und tief schwarzen einander seitlich berührenden Linien bestehen.

Dieselbe Erscheinung zeigt sich, wenn man bei diesem Versuche statt weiss und schwarz verschieden brechbare Farben auf dunklem Grunde nimmt.

Ferner wurde die Schnittfläche einer abgestumpften Pyramide in einer Projection mit gesättigtem Blau, in der anderen mit Gelb bedeckt. Entstand nun hieraus bei stereoskopischer Combination Grün, so war es Dove im Moment, wo dies geschah, als wenn er durch eine durchsichtig gewordene Farbe die andere hindurch sehe, und es schien die Farbe wie mit einem Firniss bedeckt. Der Umstand aber, dass Viele die Farben nur nacheinander sehen, liegt nach Dove einfach darin, dass dieselben die Accommodation der Augen für beide Farben abwechselnd ändern und sich nur der Grenzen dieser Aenderung, nicht der Mittelstufen bewusst werden. Betrachtet man bei stereoskopischer Combination die blau und gelb gemalte Schnittfläche der Pyramide durch ein vor beide Augen gehaltenes violettes Glas, so erscheint sie spiegelnd wie ein polirtes Metall, für ein einzelnes dagegen matt, indem wahrscheinlich, wie Dove vermuthet, das violette Glas bewirkt, dass die beiden zusammentretenden Farben durch das ungleiche Absorptionsvermögen zu gleicher Intensität gebracht werden.

301. Dove äussert sich nun in Bezug auf die Entstehung des Glanzes folgendermassen: „Unter allen Fällen, wo eine

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXIII. S. 180; — Darstellung der Farbenlehre und optische Studien, Berlin 1852, S. 171 ff.

Fläche glänzend erscheint, ist es immer eine spiegelnde durchsichtige oder durchscheinende Schicht von geringer Mächtigkeit, durch welche hindurch man einen anderen Körper betrachtet. Es ist also äusserlich gespiegeltes Licht in Verbindung mit innerlich gespiegeltem oder zerstreutem, aus deren Zusammenwirkung die Vorstellung des Glanzes entsteht. Dies steigert sich bei der Anzahl der Abwechselungen beider Körper. Daher nimmt aufgeblätterter Glimmer Metallglanz an, Sätze von Glasscheiben hingegen Perlmutterglanz. Die beiden auf das Auge wirkenden Lichtmassen wirken auf dasselbe aus verschiedenen Entfernungen. Indem nun das Auge sich dem durch die durchsichtige Schicht gesehenen Körper anpasst, kann das von der Oberfläche zurückgespiegelte Licht nicht deutlich gesehen werden, und das Bewusstsein dieser undeutlich wahrgenommenen Spiegelung erzeugt die Vorstellung des Glanzes. Der Glanz ist daher stets im eigentlichen Sinne ein falscher, ein Beiwerk, welches blenden kann, das aber, wenn wir es beachten, die Sache auf die es ankommt, scharf ins Auge zu fassen verhindert. Er verschwindet daher, wenn man die Spiegelung fortschafft, indem man unter dem Polarisationswinkel durch ein Nicol'sches Prisma auf den Firniss eines Gemäldes sieht. Die Modificationen, welche durch den Reflex des Lichtes der spiegelnden Flächen aus dem Gangunterschied zweier Lichtmengen in Beziehung auf die daraus resultirenden Lichtschwingungen entstehen, sind daher nicht Ursachen des Glanzes, sondern vielmehr Nebenfolgen der Bedingungen, unter welchen er überhaupt entsteht."

Gegen diese Theorie wurden von Brewster*) einige Einwendungen erhoben, die Dove**) neuerdings veranlassten, nochmals auf dieselbe zurückzukommen, wobei namentlich die von Brewster aufgestellte Behauptung zurückgewiesen wird, dass die Dove'sche Erklärung verlange, es müsse das Licht der einen Fläche durch die der anderen hindurchgehen; — ein Missverständniss, zu dessen Beseitigung der im Vorstehenden ausgesprochene Satz, bezüglich des Gangunterschiedes beider Lichtmengen, der dort gegebenen Erklärung hinzugefügt sei. Auch schliesse die stereoskopische Combination zweier Flächen in der Wirklichkeit vollständig das

*) Athenäum, 1855. p. 1125.

**) Optische Studien, Fortsetzung der in der Farbenlehren enthaltenen, Berlin 1859. S. 1 ff.

Hindurchgehen des Lichtes der einen Fläche durch die andere aus; wohl aber sehe es bei den betreffenden stereokopischen Versuchen, besonders bei blauen und gelben Flächen, so aus, als wenn man durch die eine durchsichtig gewordene die andere erblicke, da, wenn man zwei Flächen an derselben Stelle zu sehen glaube, nothwendig die Vorstellnng entstehe, als ob die eine durch die andere gesehen werde; was indess nur eine im Zustande der Ruhe, also bei bestimmter Richtung der Augenaxen hervortretende Vorstellung sei.

In Hinsicht auf den Vergleich einer glänzenden Fläche mit einem von Firniss bedeckten Gemälde, woran Brewster Anstoss nahm, bemerkt Dove noch, dass, wenn wir unter sehr schiefem Winkel dasselbe sehen, nur das gespiegelte Licht erscheine, und das Bild gar nicht gesehen werde; schaffe man durch ein Nicol'sches Prisma das äusserlich gespiegelte Licht fort, so sehe man das Bild, aber mit todten Farben: daher nur die Verbindung beider bewirkt, dass wir sagen, der Eindruck des Bildes werde durch den Glanz gehoben. Beim Poliren einer rauhen Metallfläche gehe aber zerstreutes Licht durch glänzende Mittelstufen, bei denen die Farbe immer mehr verschwinde, in gespiegeltes Licht über, und die vollständige Spiegelung vernichte zuletzt die Farbe so, dass durch die Politur das Metall stets weisser werde.*)

302. Wir haben im Verlauf unserer Betrachtung schon einmal den Eindruck des Schwarz als einen positiven Zustand der Seele hervorgehoben (S. 410 f.). Jedenfalls dürfen wir das Sehen des Schwarz nicht als eine blosse Negation des Sehens auffassen, was auch bereits von verschiedenen Forschern anerkannt ist**). Die Vorstellung des Schwarz ist die Vorstellung einer bestimmten Farbe, der physiologisch das von aussen ungereizte, seiner Selbstthätigkeit überlassene, Sehorgan entspricht, und die wir haben, mögen wir nun die Augen auf eine schwarze Fläche richten oder dieselben schliessen und von allem äusseren Lichte abhalten. Auch

---

*) Bez. des Glanzes s. auch Oppel, Poggend. Ann. Bd. C. S. 462, und Helmholtz in Verhandl. des naturhist. Vereins der Rheinlande, 1856. S. 27.

**) s. u. A. Purkinje, Beiträge zur Kenntniss des Sehens; — Volkmann, Art. Sehen in R. Wagner's Handw. der Physiol. Bd. III. 1. S. 265; — Lotze, Medicinische Psychologie. Leipzig 1852. S. 218 u. 380; — Fechner, Elemente der Psychophysik, Leipzig 1860, Th. I. S. 165.

ist die Empfindung des Schwarz verschiedener Grade fähig, wie man einmal findet, wenn man verschiedene objectiv gegebene schwarze Flächen betrachtet, die noch einiges weisse Licht in verschiedenem Masse reflectiren, so wie auch dann, wenn man die Augen in gewöhnlicher Tageshelle einfach schliesst, wo man ein Schwarz wahrnehmen wird, das sich meist sehr merklich an Tiefe steigert, wenn man beide Augen, zur Abhaltung allen äusseren Lichtes mit den Händen bedeckt, daher man denn auch mit gutem Grunde von verschiedenen Graden der Helligkeit des uns erscheinenden schwarzen Gesichtsfeldes sprechen kann. Und es ist auch sehr wohl möglich, dass die Helligkeit oder, was dasselbe, die Tiefe des schwarzen Gesichtsfeldes, bei von aussen ungereizten Augen, für verschiedene Personen eine verschiedene ist. Nichts aber nöthigt zu der Annahme, dass die Elemente der Retina und des Sehnerven, wenn von aussen ungereizt, sich im Zustande völliger Ruhe befinden, vielmehr ist als wahrscheinlicher anzunehmen, dass diese Elemente, auch wenn sie nicht von Aussen her afficirt werden, innerhalb gewisser Grenzen in Schwingungen um eine bestimmte Lage begriffen sind, in Schwingungen, die durch Erweiterung ihrer Excursionen und wohl auch durch Veränderung ihrer Oscillationsdauer aus der Empfindung des tiefsten Schwarz zur Empfindung des reinen Weiss führen können, wenn die Retina allmälig durch grössere Mengen sog. weissen Lichtes oder auch sonst wie gereizt wird. Je weiter aber die bezeichneten Elemente von ihrer dynamischen Gleichgewichtslage und den diesem Zustande entsprechenden Bewegungsverhältnissen abgewichen sind, desto dringender ist auch gewiss ihr Bestreben zur Rückkehr in dieselben, so dass, falls dieses Bestreben Erfolg hat, auch die Empfindung des Schwarz sich wieder einstellt. — Wir werden auf diesen Gegenstand an einem anderen Orte noch einmal in gehörigem Zusammenhange zurückkommen.

303. Die photometrische Intensität des inneren Augenschwarz suchte Volkmann*) dadurch zu bestimmen, dass er im Nachtdunkel ein einziges Licht so weit von einem schattenwerfenden Körper entfernte, bis der lediglich vom Augenschwarz erfüllte Schatten von dem durch das Augenschwarz und die äussere Erleuchtung zugleich erhellten Grunde eben nicht mehr zu unterscheiden war. Bei dieser Entfernung betrug dann die Erleuchtung,

*) s. Fechner's Elemente der Psychophysik, Leipzig 1860. S. 167.

welche das Licht dem Augenschwarz zufügte, etwa $\frac{1}{100}$ von der Intensität des letzteren. Dieser Zahlenwerth war zuvor ermittelt*) durch ein Verfahren, das, nach Fechner's Bemerkung, in ähnlicher Weise auch schon Bouguer benutzt hatte, nämlich durch Beobachtung der Schatten, welche ein Stab unter der Beleuchtung zweier Lichtquellen auf eine vertikale weisse Tafel warf, indem das eine Licht L, eine brennende Stearinkerze, in einer gewissen Entfernung von der Tafel feststand, während die andere L', von gleicher Intensität mit jener, durch einen Mitbeobachter so weit von der Tafel zurückgestellt wurde, bis der von dem Beobachter scharf ins Auge gefasste Schatten, den sie warf, eben verschwand. Hierbei war der Schatten, der vom Lichte L' herrührte, vom Lichte L erhellt, während der umgebende Grund von beiden Lichtern erhellt wurde. Wenn man also, bei unveränderter Stellung des Lichtes L, das andere L' immer weiter von der schattenauffangenden Tafel entfernt, so empfängt der Grund einen immer geringeren Erleuchtungszuschuss durch L', der endlich so gering wird, dass er der Wahrnehmung des Auges entgeht und mithin der Schatten im umgebenden Grunde verschwindet. Dies geschah nun für Volkmann's Augen, wenn der Abstand der Kerze L' vom Schatten 10 mal so gross war, als der der Kerze L, so dass der Unterschied der Beleuchtungen in dem Falle, wo der Schatten der Wahrnehmung eben entging, $\frac{1}{100}$ der absoluten Beleuchtung betrug. Derselbe Werth ergab sich auch bei ganz anderen absoluten Intensitäten der Beleuchtung, die theils durch Abänderung der Intensität der Flammen, theils durch Abänderung der Distanz der Flamme L von der Tafel erhalten wurden. In allen Fällen musste die Distanz der Flamme L' nahe 10 mal so viel betragen, um den Schatten eben zum Verschwinden zu bringen.

In dem obigen auf die photometrische Intensität des Augenschwarz bezüglichen Versuche war nun der Grund, welcher den Schatten des von einer einzigen Kerze beleuchteten Stabes im Nachtdunkel umgab, von dem zerstreuten Lichte derselben Kerze erhellt, so dass sich also dieses Licht noch der Helligkeitsintensität des Augenschwarz hinzufügte. Für Volkmann's Augen verschwand der Schatten auf einem Grunde von schwarzem Sammet, als das Licht, eine gewöhnliche brennende Stearinkerze, in einem langen

*) a. a. O. S. 147 ff.

dunkeln, durch einige Zimmer noch verlängerten Gange bis auf 87 Fuss davon zurückgestellt war. Falls nun bei dieser Entfernung die Erleuchtung, die das Licht dem Augenschwarz zufügte, $\frac{1}{100}$ von der Intensität des Augenschwarz betrug, würde sie bei $\frac{1}{10}$ jener Entfernung, d. h. bei 8,7 Fuss Entfernung derselben gleich gewesen sein. Und sonach wäre die Helligkeit des Augenschwarz allein, ohne äussere Beleuchtung, der Erleuchtung einer schwarzen Fläche (von der bezeichneten Art) durch eine gewöhnliche Stearinkerze, die in etwa 9 Fuss Entfernung von derselben brennt, gleichwerthig.

304. Bekanntlich sieht man, wenn man aus der Tageshelle in ein dunkles Zimmer tritt, anfangs sehr undeutlich, gewinnt aber allmälig die Fähigkeit zur Unterscheidung der in einem solchen Zimmer befindlichen Objecte*), und umgekehrt, wenn man nach längerem Aufenthalte im Dunklen in das Helle kommt, kann man auch hier nicht sofort, sondern erst nach einiger Zeit die Gegenstände unterscheiden.

In Rücksicht des ersteren Umstandes ist die nächstliegende Erklärung die, dass die Retina beim Eintritt ins Dunkle in Folge der vorausgegangenen Lichtreizung noch merklich erregt, und also der Augengrund noch nicht dunkel genug ist, damit die schwachen Lichtunterschiede, welche das dunkle Zimmer darbietet, sich so weit geltend machen können, als zur Wahrnehmung der daselbst befindlichen Objecte erforderlich ist; wogegen Fechner**) freilich das rasche Verlöschen der Nachwirkung einwendet. Allmälig aber, bei längerem Aufenthalte im Dunklen, gewinnt das Augenschwarz mehr und mehr an Tiefe und damit auch die Retina die Fähigkeit zur Auffassung feinerer Lichtunterschiede. Natürlich muss sich wohl hierbei, in Betracht der Zeit, die nöthig ist, um für die feineren Lichtdifferenzen Empfänglichkeit zu gewinnen, nicht allein der Grad der Dunkelheit des Zimmers, sondern auch, für verschiedene Personen, die individuelle Beschaffenheit der Augen geltend machen. Das Auge lernt in einem solchen Aufenthalte erst allmälig sich für die schwachen Lichtreize einrichten, und wahr-

*) s. hierüber ein Beispiel bei Aubert in Untersuch. zur Naturlehre von Moleschott, IV. S. 224; auch Fechner, Elemente der Psychophysik, S. 323 f. — Mancherlei Hierhergehöriges findet man bei Förster, über die Hemeralogie 1857.

**) s. Elemente der Psychophysik, S. 164 u. 323 f.

scheinlich ist hier auch noch das Moment erhöhter Aufmerksamkeit und Uebung von Bedeutung.

Wenn man umgekehrt nach längerem Aufenthalte im Dunkeln ins Helle kommt, nimmt das Auge mit weitgeöffneter Pupille eine ungewöhnlich grosse Lichtmenge auf, die wohl zunächst zu einer alsbaldigen Blendung oder Abstumpfung der Retina führen kann. Allein es ist denkbar, dass der ungewöhnliche äussere Lichtreiz eine Zeitlang überhaupt zu einer tumultuarischen Schwingungsbewegung der Retinaelemente führt, wodurch eine scharfe Unterscheidung der Objecte beeinträchtigt wird, bis sich die Retina allmälig beruhigt hat und zu gewissen normalen Verhältnissen, wie sie der gewöhnlichen Tageshelle entspricht, zurückgekehrt ist. Für die Elemente der Retina muss sich hier gewissermassen erst ein neues dynamisches Gleichgewicht herstellen, ehe sie zu den Verrichtungen in der Tageshelle geschickt werden.

305. Wir haben erkannt, dass die Empfindung einer bestimmten (homogenen) Farbe durch Aetherwellen von bestimmter Länge oder, was dasselbe, durch Wellen von bestimmter Schwingungsdauer der zugehörigen Aethertheilchen bedingt ist. Indessen kann, bei sehr grosser Intensität des äusseren Eindruckes oder bei längerer Wirkung desselben auf eine und dieselbe Netzhautstelle, in Folge einer Veänderung des Organs auch eine Veränderung der Farbenempfindung herbeigeführt werden, in der Art, dass die gegebene Farbe verschwindet, obschon die sie bedingenden Aetherwellen noch die Netzhaut afficiren. In ersterer Beziehung sei hier daran erinnert, dass die durch das Prisma gesonderten Spectralfarben, wenn ihre Intensität eine sehr bedeutende Grösse erreicht, alle einzeln die Empfindung von Weiss geben; wenigstens so sehr, dass höchstens nur noch ein schwacher Anklang an die betreffende Farbe bemerkt wird*). In anderer Beziehung wollen wir hier das Verhalten der verschiedenen Retinatheile zur Farbenwahrnehmung hervorheben. Beobachtungen darüber findet man von Purkinje**), Hueck***), Brewster†) und neuerdings in umfassenderer Weise von Aubert††), welcher zunächst bestätigte,

*) s. Helmholtz in Poggend. Ann. Bd. XCIV. S. 13.

**) Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne, Bd. 2. S. 1 ff.

***) Müller's Archiv. 1840. S. 95.

†) s. Moser in Pogend. Ann. Bd. LVI. S. 194.

††) Ueber die Grenzen der Farbenwahrnehmung auf den seitlichen Theilen der Retina, in Gräfe's Archiv für Ophthalmologie, Bd. III. Abth. II. S. 38.

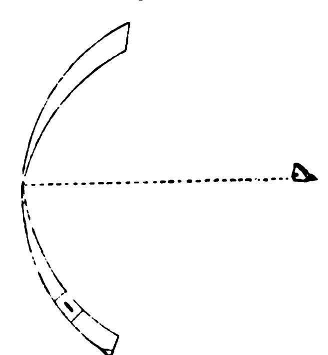
was aus den Versuchen jener hervorgeht, dass nämlich die Fähigkeit der Retina für die Wahrnehmung verschiedener Farben nach der Peripherie hin in verschiedenem Grade abnimmt und dass die Grösse der farbigen Fläche von Einfluss auf die Wahrnehmung ihrer Farbe ist.

Aubert benutzte zu seinen Versuchen möglichst intensiv gefärbtes: rothes, blaues, gelbes und grünes Papier, aus dem er je zwei Quadrate schnitt, die genau 1, 4, 16, 64, 196 und 1024 Quadratmillimeter gross waren, und klebte je eins auf ganz schwarzes, eins auf intensiv weisses (Visitenkarten-) Papier. Die Papiere waren, mit Ausnahme des weissen, matt und so stark, dass der Grund gar nicht durchschien. Um störenden Glanz oder Lichtreflex an der Oberfläche der farbigen Papiere zu vermeiden, mussten die letzteren matt sein, und war daher auch beim Aufkleben der Quadrate das Hervordringen des Gummis durchaus zu verhüten. Auch durfte der Grund der Unterlage (schwarz oder weiss) den Ton der Farbe nicht verändern, wenn die Versuchsreihen mit schwarzem und weissem Grunde vergleichbar sein sollten.

Der Apparat, dessen sich Aubert bediente, war im Wesentlichen derselbe, den er im Verein mit Förster zu den Untersuchungen über den Raumsinn der Retina benutzt hatte. Ein Halbkreis, der an einer vertikalen Stange auf und ab verschiebbar war, bestand aus zwei Blechrinnen, deren eine eine Gradeintheilung hatte, und in welchen die Karten mit den zu beobachtenden Objecten verschoben wurden. Dieser Halbkreis, dessen Durchmesser 0,2 Meter betrug, konnte in seiner Mitte um seine Axe (die Verlängerung der Sehaxe) gedreht und in verschiedenen Radien, entsprechend den Meridianen der Netzhaut, festgestellt werden. Im Mittelpunkte des Kreises befand sich das beobachtende Auge. — Bei den Versuchen wurde nun die Mitte des Halbkreises fixirt und die Karte mit dem farbigen Quadrat in der Blechrinne von dem fixirten Punkte nach der Peripherie hin allmälig entfernt, bis die Farbe verschwand. Hierauf wurde die Anzahl der Grade abgelesen, notirt



Fig. 187.



und dann der Halbkreis um seine Axe (die Sehaxe) um 45° gedreht; u. s. f.

Die Versuche wurden bei Tageslicht, und zwar Morgens und Vormittags nur bei unbewölktem Himmel in einem grossen gegen Norden gelegenen Zimmer und in derselben Entfernung vom Fenster gemacht, so dass die Unterschiede in der Beleuchtung wahrscheinlich nicht sehr gross waren.

306. Es fand sich nun, dass ein irgend wie gefärbtes Quadrat auf weissem Grunde, wenn es auf die Seitentheile der Retina über eine gewisse Grenze hinausfällt, schwarz erscheint. Doch geschieht diese Veränderung nicht plötzlich, sondern sehr allmälig. Ein höchst intensives Roth wird schon in einer geringen Entfernung vom Centrum dunkler und unscheinbarer; die Dunkelheit nimmt immer mehr zu, bis das Quadrat von der Farbe eines beginnenden Rothglühens erscheint, und endlich ganz schwarz aussieht. Diese Stelle bezeichnet Aubert als Grenzpunkt (für die Farbenwahrnehmung), der jedesmal durch einige kleine Verschiebungen des Quadrates geprüft und controlirt wurde. Die scharfe Bestimmung desselben ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden, weil die Quadrate, wenn sie schwarz werden, nicht mehr in ihrer Form, sondern nur als undeutlich begrenzte Flecke erscheinen; was besonders für helle Farben auf weissem Grunde gilt, die verhältnissmässig sehr weit vom fixirten Punkte entfernt werden müssen, ehe sie schwarz oder farblos erscheinen. Während Blau und Grün sich ähnlich wie Roth verhalten, nämlich immer dunkler und endlich schwarz werden, geht Gelb erst in ein bräunliches Gelb, dann in ein schmutziges Braun über, bis es endlich als ein dunkler, doch gerade nicht schwarzer Fleck erscheint, an dem indess auch keine Spur von Gelb mehr wahrzunehmen ist.

Noch existirt für die Quadrate eine zweite, von der Feinheit des Raumsinnes abhängige, Grenze, wo sie nämlich ganz verschwinden und man nur eine weisse Fläche sieht. Bei Quadraten von heller Farbe kann es geschehen, dass dieselben früher verschwinden, als sie ihre Farben verlieren; daher, wie Aubert bemerkt, sehr blasse Farben zu diesen Versuchen nicht gewählt werden dürfen, sondern nur solche, welche einen gewissen lebhaften Contrast mit ihrer Umgebung bilden.

Bei den Versuchen mit den farbigen Quadraten auf schwarzem Grunde erschien ein rothes, blaues, grünes und gel-

bes Quadrat jenseits einer gewissen Grenze der Netzhaut nicht mehr in seiner Farbe, sondern weiss; und zwar fanden sich auch hier allmälige Uebergänge, in der Art, dass Blau, Grün und Gelb immer heller wurden, Blau und Grün dann hellgrau erschienen und endlich ziemlich rein weiss. Roth erschien zuerst heller und matter roth, dann ward es rothgelb, hierauf graulichgelb und zuletzt etwas schmutzig weiss. — Ferner existirt auch hier, bei den Farben auf schwarzem Grunde, eine Grenze für das gänzliche Unsichtbarwerden der Quadrate; daher sich die Versuche mit dunklen Nüancen nicht anstellen lassen.

Als eine eigenthümliche Erscheinung, die mit dem Dunkel- und Hellwerden der Quadrate verbunden sei, hebt Aubert*) hervor, dass dieselben zugleich kleiner als beim directen Sehen erscheinen, was er von einer Urtheilstäuschung herleitet, mitunter auch nicht mehr quadratisch, sondern als undeutlich begrenzte Rechtecke, deren lange Seite im Retinalmeridian liegt.

307. Aus den Zahlentabellen seiner Versuchsreihen zieht nun Aubert**) folgende Schlüsse, die sich auf die Abhängigkeit der Farbenwahrnehmung, mittelst der Seitentheile der Retina, von der Grösse der farbigen Fläche, auf das Verhalten der Retina in verschiedenen Meridianen, auf den Einfluss des die farbige Fläche umgebenden Grundes, und endlich auf die Wahrnehmungsfähigkeit für verschiedene Farben beziehen.

1) Je grösser eine farbige Fläche ist, um so weiter vom Retinalcentrum entfernt wird ihre Farbe erkannt; doch nimmt die Fähigkeit, die Farbe einer Fläche wahrzunehmen, nach den Seitentheilen der Retina nicht mit der Grösse der Quadrate proportional zu, sondern viel langsamer. 2) Der Grenzpunkt für die Farben liegt bezüglich verschiedener Retinalmeridiane ungleich weit vom Centrum, und zwar am weitesten nach innen (auf die Retina bezogen), weniger weit nach unten und oben, noch näher nach aussen, so dass die Feinheit der Farbenwahrnehmung nach der inneren Peripherie der Netzhaut hin langsamer abnimmt, als nach oben und unten. 3) Die specifische Farbenwahrnehmung geht an den Seitentheilen der Retina um so eher in eine blosse Wahrnehmung von Hell und Dunkel über, je stärker dieselbe mit der Um-

*) a. a. O. S. 44.
**) a. a. O. S. 51 ff.

gebung contrastirt. 4) Ist es wahrscheinlich, dass auf den Seitentheilen der Retina kein bedeutender Unterschied in der Wahrnehmungsfähigkeit für verschiedene Farben stattfindet.

Die Unfähigkeit der Seitentheile der Retina, Farben nicht mehr zur Empfindung zu bringen, beruht aber, wie sich Aubert überzeugte, zum Theil wenigstens auf einer schnellen Ermüdung derselben. Fixirt man ein rothes Quadrat auf weissem Grunde einige Minuten möglichst unverwandt mit den centralen Theilen der Retina, so wird es gleichfalls immer dunkler und zuletzt schwarz, indem hier durch die lange Dauer des Eindrucks eine Abstumpfung für das Roth entsteht und die Complementärfarbe dasselbe verdecken hilft, so dass das Quadrat unter Mitwirkung des Contrastes der weissen Umgebung schwarz wird. Je weiter man sich nun von den Centraltheilen der Retina entfernt, um so kürzere Zeit gehört, nach Aubert, dazu, damit das Quadrat dunkel und schwarz erscheint; und es lässt sich annehmen, dass die Seitentheile der Retina weit schneller ermüden, als die centralen. Auch Purkinje*) hatte schon beobachtet und ausgesprochen, dass die Sehkraft in der Region des indirecten Sehens viel früher erschöpft und gegen äussere Eindrücke unempfindlich wird, als im Axenpunkte des Auges, wo das directe Sehen seinen Sitz hat.

Für farbige Quadrate auf schwarzem Grunde stellen sich ähnliche Verhältnisse heraus, wenn man dieselben mit den centralen Retinatheilen sieht. Aubert fixirte ein rothes Quadrat (von 4 Quadratmillimeter) eine Minute lang, accommodirte dann sein Auge für grössere Nähe, ohne jedoch die Richtung des Auges zum Object zu verändern, und ging hierauf allmälig wieder zur richtigen Accommodation über, wo er dann das Quadrat vollkommen scharf begrenzt und weiss sah. Indess dauerte die weisse Färbung immer nur kurze Zeit (15 bis 21 Secunden); das Quadrat erschien dann abwechselnd roth, wie mit einem rothen Nebel übergossen, und weiss, und endlich wieder etwas glänzend roth. Durch die Veränderung der Accommodation konnte aber die weisse Färbung wieder herbeigeführt werden.

308. Da auf den Seitentheilen der Retina nur farbige Quadrate von einer gewissen Grösse farblos, grössere hingegen an derselben Stelle in ihrer specifischen Farbe erscheinen; so entstand

---

*) Beob. u. Vers. zur Physiol. der Sinne. II. S. 14.



die Frage, ob sehr kleine farbige Flächen auch auf den Centraltheilen der Retina farblos erscheinen. Purkinje*) sprach sich hierüber, wie auch Aubert hervorhebt, bejahend aus, und imgleichen bemerkt E. H. Weber**), dass man durch einen sehr engen Spalt eine grüne Fläche nicht mehr als grün sehe, daher eine gefärbte Fläche eine gewisse Ausdehnung haben müsse, um in ihrer specifischen Farbe erscheinen zu können. In Uebereinstimmung damit folgert Aubert aus seinen Versuchen, dass farbige Flächen bei gewöhnlicher Tageshelle eine gewisse Ausdehnung haben müssen, wenn ihre Farbe empfunden werden soll sowohl bei directem als bei indirectem Sehen, eine Ausdehnung, die für ein rothes Quadrat auf weissem Grunde mehr als 34 Secunden betragen muss. Und nach seinen Erfahrungen glaubt derselbe den Satz aufstellen zu können, „dass in der Farbenempfindung nur ein gradueller Unterschied zwischen den peripherischen und centralen Theilen der Retina stattfindet, und dass die geringere Feinheit des Farbensinnes auf den peripherischen Theilen der Netzhaut theils eine absolute, in dem Bau und der Anordnung der Netzhautelemente begründete ist, theils auf einer schnelleren Ermüdung derselben beruht."

Wie nun Quadrate, deren Farbe verschwunden ist, noch weiter seitlich verschoben, der Wahrnehmung ganz entgehen, so zeigt sich Gleiches auch beim directen Sehen, wenn der Gesichtswinkel sehr klein wird, wo man dann von den Quadraten ebenfalls nichts mehr sieht. Indessen findet dieses Verschwinden eines farbigen Quadrats, wie Aubert fand, bei verschiedenen Entfernungen oder Gesichtswinkeln statt, je nachdem man Farben wählt, die mit der Umgebung mehr oder minder contrastiren. Und mit Rücksicht auf die von Plateau gemachte Beobachtung, dass bei gleicher Lichtstärke ein weisses Bild, um noch gesehen zu werden, kleiner als ein gelbes, dieses kleiner als ein rothes, und letzteres kleiner als ein blaues sein kann, hebt Aubert einen gewissen Zusammenhang zwischen dem Raum- und Farbensinn der Retina hervor, der sich eben darin zeige, dass eine farbige Fläche eine gewisse Grösse und Ausdehnung haben müsse, um farbig zu erscheinen, und anderer-

---

*) Commentatio de examine physiologico organi visus et systematis cutanei. Vratislaviae, 1823. p. 15.

**) Müller's Archiv. 1849. S. 279.

seits eine Fläche von einer gewissen Grösse diese oder jene Farbe darbieten müsse, um noch gesehen zu werden. Zwischen den centralen und peripherischen Theilen der Retina würde dann der Unterschied der sein, dass der Farben- und Raumsinn in der Peripherie stumpfer, im Centrum der Farbensinn im Verhältniss zum Raumsinn schärfer, an der Peripherie dagegen der Raumsinn im Verhältniss zum Farbensinn schärfer ist.

309. Obwohl die Aetherwellen gewiss, sobald sie zur lichtpercipirenden Schicht der Retina gelangt sind, dieselbe sofort in Erregung versetzen, ist es doch andererseits eben so gewiss, dass die Fortpflanzung des Erregungszustandes zum Gehirn einer gewissen Zeit bedarf und somit auch die Aufnahme des von aussen erregten Eindruckes ins Bewusstsein, selbst abgesehen von Hindernissen in der Seele, d. h. von etwaigem Mangel an Aufmerksamkeit oder von entgegenstehenden Vorstellungen, die wegen ihrer hemmenden Einflüsse die Aufnahme des Eindruckes ins Bewusstsein erschweren.

Wie ungemein rasch übrigens die Aetherwellen die Retina in Erregung versetzen, lässt sich daraus entnehmen, dass man die vom Lichte eines elektrischen Funkens beleuchteten Gegenstände erkennen kann, obschon die Dauer desselben nur etwa $\frac{1}{1000000}$ Secunde beträgt. Freilich erkennen wir die also beleuchteten Gegenstände wohl nicht während der kurzen Dauer des Funkens; jedenfalls geschehen aber die Erregungen der Retina innerhalb dieser Zeit, so dass die vom Sehnerven fortgeleiteten Erregungszustände zur Erkennung jener Objecte führen. Auch verschwinden die Erregungszustände des Sehorgans und die entsprechenden Lichtempfindungen nicht sofort mit dem Aufhören der äusseren, primären Lichteinwirkung, sondern dauern noch eine Weile fort, daher denn auch noch eine Zeitlang Nachbilder der gesehenen Objecte zurückbleiben, wie man bei gehöriger Aufmerksamkeit leicht finden kann. Die Lichteindrücke verschwinden von dem Maximum ihrer Stärke ab nicht plötzlich, sondern allmälig.

Dass der Eindruck, welchen das Licht (d. h. die Aetherwellen) auf die Retina macht, noch eine Zeitlang fortdauert, während dasselbe bereits aufgehört hat die Retina zu treffen, ergibt sich, um

*) s. Volkmann in R. Wagner's Handw. der Physiol. III. 1. S. 329; und Dove.

ein bekanntes Beispiel anzuführen, schon aus dem leuchtenden Kreise, den man beim Herumschwingen einer glühenden Kohle oder des glühenden Endes eines Stockes wahrnimmt; was gewiss nur daher kommen kann, dass die vorhergehenden Eindrücke noch andauern, wenn während der Bewegung der Kohle andere Stellen der Retina von den Lichtstrahlen getroffen werden.

In Rücksicht auf die Zeit der Fortdauer eines Lichteindruckes fand sich, dass dieselbe im Allgemeinen um so länger ist, je grösser die Intensität der primären Lichteinwirkung ist, und je länger die letztere die Retina afficirt.

310. Beschreibt eine glühende Kohle, wie wir oben annahmen, einen Kreis, so wird es, damit der ganze Kreis leuchtend erscheine, erforderlich und hinreichend sein, wenn die Kohle auf jeden Punkt ihrer Bahn genau in dem Augenblick zurückkehrt, wo der Eindruck, den ihr vorhergehender Aufenthalt daselbst bewirkte, verschwindet. Gewiss würde nun, wenn die Kohle gerade die eben bezeichnete Geschwindigkeit hätte, die Dauer eines ganzen Umlaufes gleich sein der eines Lichteindruckes. Dieses Mittel benutzte d'Arcy*), um die Dauer des Eindruckes, den ein kleiner Gegenstand auf unser Gesichtsorgan macht, zu messen, indem er dem Gegenstande eine Kreisbewegung ertheilte und dieselbe allmälig soweit beschleunigte, bis die scheinbare Bahn des Gegenstandes einen vollständigen Kreis bildete. Die Dauer dieses Umlaufes, deren Bestimmung sich aus der Zahl der in einer gegebenen Zeit beschriebenen Umläufe ergab, wurde dann als die Dauer des Eindrucks genommen.

Auf solche Weise erhielt d'Arcy für die Dauer des von einer glühenden Kohle erzeugten Eindrucks 8 Terzien oder 0,133 Secunde. Newton**) schätzt diese Dauer auf 1″, Segner***) auf 30 Terzien, Cavallo †) auf 6 Terzien, und Th. Young ††) ohne Angabe Versuchen auf 0,01 bis 0,5″.

*) Mém. de l'Acad. 1765.

**) Optices lib. III. quaest. XVI.; lib. I. pars. II. prop. V. exper. X.

***) De raritate luminis. Gott. 1740.

†) Naturlehre, übers. von Trommsdorff.

††) A Course of lectures on natur. philos. T. I. p. 455.

Plateau *) versuchte mittelst des von d'Arcy angegebenen Verfahrens die Dauer bei verschiedenartig gefärbten und vom gewöhnlichen Tageslicht beleuchteten Objecten zu bestimmen, fand aber dabei einige Schwierigkeiten, die er zu beseitigen suchte. Die Vorrichtung, die er benutzte, bestand, wie die von d'Arcy, aus einem System von vertikalen Rädern, die so von Gewichten in Bewegung gesetzt wurden, dass das letzte Rad eine beträchtliche Geschwindigkeit erlangen konnte, während die des Rades mit dem Gewichte nur sehr gering war. Die Axe jenes Rades trug einen Zeiger mit einer Pincette am Ende, bestimmt die Objecte zu halten. Durch Vermehrung oder Verminderung der Gewichte konnte man dem Zeiger alle möglichen Grade von Geschwindigkeit ertheilen, und seine Bewegung, die in den ersten Augenblicken eine beschleunigte war, wurde nach einigen Minuten, in Folge der Reibung und anderer Widerstände, gleichförmig. Dieses Instrument, das zur Regulirung seines Ganges noch mit einer Windfahne versehen war, wurde nun in der Höhe des Auges einem Fenster gegenüber aufgestellt. Da das Ende des erwähnten Zeigers einen Kreisumfang beschrieb, und alle wünschenswerthe Grade von Geschwindigkeit erlangen konnte, so befand sich das farbige Object unter den erforderlichen Bedingungen. Um die Dauer eines Umlaufes desselben zu bestimmen, liess man das Instrument eine bestimmte Zeit hindurch gehen, und zählte die Umläufe eines der ersteren Räder, wo sich dann aus der Zahl der Zähne auf den Rädern und Getrieben die Zahl der Umläufe des letzten Rades, und aus dieser Zahl, dividirt durch die Zeit, die Dauer eines Umlaufes ergab.

Hinter dem Zeiger stellte Plateau eine Pappscheibe auf, überzogen mit schwarzem Sammt, als der Substanz, die den möglich dunkelsten Grund darbot.

Mit Rücksicht auf den Umstand aber, dass, wie eine gewisse Zeit erforderlich ist, damit ein einmal gebildeter Eindruck vollständig verschwinde, so auch derselbe einer gewissen Zeit zu seiner vollen Bildung bedarf, schien es erforderlich, dem gefärbten Gegenstande eine beträchtliche Breite zu geben. Dann ist jedoch die

*) Dissertation sur quelques propriétés des impressions produites par la lumière etc. par H. Plateau de Bruxelles. Liège 1829. — Poggend. Ann. Bd. XX. S. 304.

Dauer eines Eindruckes, streng genommen, nicht mehr gleich der eines Umlaufes, wie bei Anwendung eines kleinen Objects, dessen Breite man ohne Fehler vernachlässigen kann; vielmehr ist hier von der Dauer eines Umlaufes die Zeit abzuziehen, welche zwischen den Durchgängen der beiden Enden des Gegenstandes durch einen Punkt im Kreise verfliesst. Hiernach wird, wenn der Gegenstand z. B. ein Viertel des Kreisumfanges einnimmt, die Dauer des Eindrucks gleich drei Vierteln der Dauer eines Umlaufes sein.

311. Zu seinen Versuchen benutzte nun Plateau gefärbte Papierstreifen, begrenzt durch zwei Kreisbogen, die ihre Mittelpunkte auf der Axe des Zeigers hatten, und durch zwei Radien, die einen rechten Winkel miteinander bildeten. Die Versuche wurden mit weissem, gelbem, rothem und blauem Papier (gefärbt mit Gummigutt, Carmin und Berlinerblau) angestellt, und gaben für die Dauer eines Eindrucks, in Sexagesimalsecunden, folgende Resultate:

	Weiss.	Gelb.	Roth.	Blau.
	0″,34	0″,36	0″,33	0″,31
	0 ,33	0 ,36	0 ,37	0 ,30
	0 ,35	0 ,36	0 ,37	0 ,34
	0 ,35	0 ,35	0 ,33	0 ,30
	0 ,38	0 ,36	0 ,35	0 ,34
	0 ,37	0 ,34	0 ,32	0 ,36
Mittel	0″,35	0″,35	0″,34	0″,32

Sonach bewirken Weiss und Gelb die dauerndsten Eindrücke, wonach Roth und endlich Blau folgt.

Durch weitere Versuche suchte nun Plateau das Gesetz festzustellen, nach welchem die einmal gebildeten Eindrücke abnehmen.

Eine Papierscheibe wurde in eine gewisse Anzahl gleicher Sectoren, und zwar in 24, getheilt und von jedem Sector mittelst zweier concentrischer Kreise ein krummliniges Trapez abgeschnitten. Zwölf dieser Trapeze wurden mit irgend einer Farbe angestrichen und die übrigen zwölf geschwärzt, so dass jede gefärbte Fläche sich zwischen zwei schwarzen befand. Und noch besser erschien es, die letztgenannten Flächen auszuschneiden, und hinter der Scheibe ein mit schwarzem Sammt überzogenes Pappstück anzubringen. Man befestigte nun die Scheibe an das Instrument, so dass ihr Mittelpunkt auf der Axe des letzten Rades lag, und vermehrte die Geschwindigkeit der Umdrehung, bis man zu einem Punkte ge-

langte, wo ein gleichförmiger Farbenton erschien. Alsdann zeigte sich der ganze Raum, welcher in schwarze und gefärbte Felder getheilt war, vollkommen schlicht, und seine Farbe war der gleich, welche aus einer Vermengung von Schwarz mit der Nuance der gefärbter Felder entstehen würde. Waren die schwarzen Felder ausgeschnitten, so erschien die Scheibe durchsichtig, und Gegenstände, die man zwischen der Scheibe und dem schwarzen Sammt anbrachte, waren wie durch einen gefärbten Schleier sichtbar; denn der hinter der Scheibe befindliche Gegenstand muss, wie Plateau bemerkt, durch die vorübergehenden Oeffnungen und gefärbten Felder abwechselnd sichtbar und verdeckt werden, also auf der Netzhaut eine Reihe von Eindrücken machen, welche, wenn die Geschwindigkeit beträchtlich ist, nur einen einzigen, aber unvollkommenen bilden, der sich mit dem der gefärbten Felder combinirt.

Plateau unterwarf nun die nachbenannten Farben diesem Versuche und ermittelte für jede derselben genau die Geschwindigkeit, welche zur Hervorbringung eines gleichförmigen Farbentones nöthig war, indem man das den Apparat in Bewegung setzende Gewicht stufenweise vermehrte, bis der Farbenton gleichförmig geworden war, und dann genau bei diesem Punkte einhielt. Die Zahlen drücken die Dauer eines Umlaufes aus.

	Weiss.	Gelb.	Roth.	Blau.
	0″,191	0″,201	0″,248	0″,323
	0 ,194	0 ,201	0 ,230	0 ,295
	0 ,198	0 ,202	0 ,227	0 ,264
	0 ,182	0 ,192	0 ,224	0 ,297
Mittel	0″,191	0″,199	0″,232	0″,295

Dividirt man die Dauer eines Umlaufes durch 24, so erhält man den Zeitraum zwischen den Durchgängen zweier aufeinander folgender gefärbter Felder, oder die Zeit, während welcher ein Eindruck sich ohne merklichen Verlust erhält. Die hierdurch erlangten Zahlen nehmen aber, wie ein Blick auf die obigen Mittelwerthe erkennen lässt, von Weiss zu Blau hin zu, woraus folgt, dass der Eindruck des Blau länger ohne merkliche Abnahme beharrt als der des Rothen, dieser wieder länger als der des Gelb, und noch viel länger als der des Weiss. Oder mit anderen Worten: der Eindruck des Blau nimmt langsamer ab als der des Roth, der des letzteren langsamer als der Eindruck des Gelb, u. s. f.; daher in dieser Hinsicht die genannten Farben in der Ordnung: Blau, Roth, Gelb,

Weiss folgen. Der stärkere (lebhaftere) Eindruck nimmt also schneller ab als der schwächere.

Indessen ist, nach einer Bemerkung von Plateau, daraus dass der Eindruck des Blau z. B. langsamer als der des Roth erlischt, nicht zu schliessen, dass die Gesammtdauer desselben länger als die des letzteren sei. Der lebhafteste Eindruck nimmt am schnellsten ab, obschon er die längste Zeit nöthig hat, um ganz zu verschwinden. Und jeder Eindruck, der im Verlöschen begriffen ist. nimmt im ersten Moment, wo er noch stark ist, am schnellsten ab, indess seine Abnahme, so wie er an Kraft verliert, auch langsamer wird.

312. Die Versuche Plateau's sind von Emsmann*) mit Sorgfalt wiederholt worden. Derselbe setzte Rechtecke aus gleichmässig gefärbten Papieren von 8 Zoll Länge und 4¾ Zoll Breite, sowie von 8 Z. Länge und 3 Z. Breite auf einer mit schwarzem Sammet überspannten Scheibe in gleichmässige Rotation. Nun zeigte sich, als die Maschine in Bewegung gesetzt war, bei einer gewissen Geschwindigkeit eine Kreisfläche von der Farbe des Papiers, im Durchmesser gleich der Entfernung der beiden längsten Rechtecksseiten, umgeben von einer eben so gefärbten Kreislinie, deren Durchmesser der Entfernung der beiden kurzen Rechtecksseiten gleich war; und ausserdem umgab jene Kreisfläche ein durchscheinender, zackiger Schleier, welcher noch über die bezeichnete Kreislinie hinausging, so dass die Spitzen der Zacken auf der Peripherie eines Kreises lagen, dessen Halbmesser gleich der halben Diagonale des Rechtecks war. Die Zwischenräume der Zacken erschienen bogenförmig begrenzt. War die Umdrehungsgeschwindigkeit noch nicht gross genug, so bildete sich die Kreisfläche nicht und die spitzen Zacken waren nicht wahrzunehmen; war die Kreisfläche entstanden und nahm die Geschwindigkeit ab, so verlor sich die Form des Kreises.

Es wurde nun die Zeit (in Secunden) bestimmt, welche bei gleichförmiger Geschwindigkeit nöthig war, die Kreisfläche eben noch nicht rein hervortreten zu lassen. Die benutzten Farben waren aus Papierbogen geschnitten, wie man sie bei den Buchbindern findet, also glänzend, und ergaben folgende Resultate.

---

*) Poggend. Ann. Bd. XC. S. 611. — Bezüglich des gebrauchten Apparach Emsmann, physikal. Aufgaben, Leipzig 1852. S. 55. Aufg. 20.

Bei Tage:

Dunkelblau.	Gelb.	Mittelgrün.	Dunkelgrün.	Weiss.	Roth.	Mittelblau.
0,"29	0,27	0,26	0,26	0,25	0,24	0,22.

Beim Lichte einer sog. Schiebelampe.

Dunkelblau.	Dunkelgrün.	Gelb.	Weiss.	Roth.	Mittelgrün.	Mittelblau.
0,"35	0,35	0,31	0,30	0,29	0,26	0,26.

Bei Vergleichung dieser Zahlen mit denen von Plateau (S. 470) ergibt sich, dass Emsmann im Allgemeinen kleinere Zeitbestimmungen erhielt als Plateau. Zwischen Weiss und Gelb fand Emsmann eine entschiedene Differenz. Als er mit farbigen Papieren experimentirte, die wie bei Plateau getuscht waren, erhielt er im Tageslicht kleinere Werthe als die obige Reihe mit den glänzenden Farben (bei Tage) darbietet. Der Lichteindruck war also durch den Glanz der zuerst angewendeten Papiere verstärkt worden.

Sodann wiederholte Emsmann die Plateau'schen Versuche in Bezug auf die Abnahme des Eindrucks, wobei er die oben bezeichneten glänzenden Papiere, in denen er 12 Sectoren ausgeschnitten hatte, benutzte. Es fand sich:

Weiss.	Gelb.	Roth.	Mittelblau.
0",55	0,58	0,62	0,72.

Die Reihenfolge dieser Zahlenwerthe stimmt mit der Plateau's (S. 471), so dass also der schwächere Eindruck langsamer abnimmt als der stärkere; nämlich der Eindruck des Blauen langsamer als des Rothen, dieser langsamer als der des Gelben und dieser wieder langsamer als der des Weissen.

313. Es gibt nun eine Menge von Erscheinungen, die durch die Thatsache der Fortdauer des Lichteindrucks ihre Erklärung finden. Auch hat man viele Apparate construirt, deren Wirkung auf der Dauer des Lichteindrucks beruht. So das von de Paris *) angegebene Thaumatrop. Dasselbe besteht meist aus einer Anzahl kreisförmiger Scheiben von Kartenpapier, 2 bis 3 Zoll breit, die mittelst zweier an entgegengesetzten Punkten der Scheibe befestigter Fäden durch den Daumen und Zeigefinger in eine sehr schnelle drehende Bewegung versetzt werden können. Auf jeder Seite der Scheibe befindet sich der Theil eines Gemäldes oder ver-

*) Edinb. Journ. of science. No. VII. pg. 87.

schiedene Theile derselben Figur, dergestalt, dass diese Theile, falls wir sie zugleich sehen könnten, entweder eine Gruppe oder eine ganze Figur bilden würden. Ist z. B. auf die eine Seite der Scheibe ein Vogel, auf die andere ein Vogelbauer gemalt; so erscheint beim Umdrehen der Scheibe der Vogel im Bauer, weil der Eindruck des Bildes auf der einen Seite noch fortdauert, wenn das Auge von dem Bilde auf der anderen Seite einen Eindruck empfängt.

Gleichfalls hierher gehören die von Stampfer *) erfundenen stroboskopischen Scheiben, die auch gleichzeitig von Plateau **) unter dem Namen Phantoskop (Phantasmaskop oder Phänakistiskop) angegeben und ausgeführt wurden. Am Rande einer Pappscheibe, von etwa 6—10 Zoll Durchmesser, die um eine durch ihren Mittelpunkt gehende horizontale Axe in rasche Drehung versetzt werden kann, sind viereckige Löcher, von etwa $\frac{3}{4}$ Zoll Höhe und $\frac{1}{2}$ Zoll Breite, in gleichen Abständen voneinander angebracht. Unterhalb dieser Löcher befinden sich auf der einen Seite der Scheibe Zeichnungen, die einen Gegenstand in verschiedenen Stellungen, — etwa die Bewegung einer Person, welche eine bestimmte Handlung vollzieht, — darstellen, so dass jedem Loche eine andere Stellung entspricht. Hält man nun die Scheibe mit der bemalten Seite vor einen Planspiegel und versetzt man sie in rasche Umdrehung, während das Auge eine solche Stellung hat, dass es durch die Löcher in den Spiegel sehen kann; so werden der Reihe nach die verschiedenen Stellungen vor dem Auge vorübergehen und im Spiegel erblickt man die Figur in Bewegung, da sich die Stellungen aneinander reihen, insofern der Eindruck der einen noch nicht verschwunden ist, wenn der Eindruck der folgenden in das Auge gelangt.

Ein den stroboskopischen Scheiben verwandter Apparat ist das sog. Dädaleum von Horner ***).

Eine andere Erscheinung, die zuerst Roget †) näher behandelt, gehört ebenfalls hierher. Betrachtet man nämlich durch eine

*) Jahrb. des polytechn. Instituts in Wien. Bd. XVIII. S. 237.

**) Correspond. astronom. et phys. de l'observ. de Bruxelles. T. IV. p. 393; T. VI. p. 121; T. VII. p. 365; — Ann. de Chim. et Phys. T. LIII. p. 304; — Poggend. Ann. Bd. XXXII. S. 647.

***) Poggend. Ann. Bd. XXXII. S. 650.

†) Poggend. Ann. Bd. V. S. 93.

Reihe vertikaler Oeffnungen, z. B. durch die Zwischenräume eines Gitters, das Rad eines auf dem Boden mit grosser Geschwindigkeit dahinrollenden Wagens, so erblickt man statt der einzelnen geraden Speichen unbewegliche Curven auf der Fläche des Rades; — eine Erscheinung, die sich im Wesentlichen nicht ändert, wenn die Stäbe des Gitters sich horizontal fortbewegen, während das Rad sich um eine feste Axe dreht. Reflectirt man, der Einfachheit wegen, nur auf eine Speiche und eine Oeffnung, so werden diese beiden Linien, deren eine sich um einen festen Punkt dreht und die andere parallel mit sich selbst fortrückt, sich dem Anschein nach in einer Reihe von Punkten schneiden, deren Gesammtheit eine bestimmte Curve bildet. Wenn nun die Speiche gehörig beleuchtet und die Oeffnung in einem dunklen Schirme ausgeschnitten ist, wird jeder Durchschnitt ein helles Bild auf der Retina erzeugen, und die Folge dieser Bilder muss den Anblick einer zusammenhängenden Curve gewähren, weil der Eindruck von dem ersten Bilde noch vorhanden ist, wenn der vom zweiten Bilde bewirkt wird. Die Gestalt der Curve wird von der ursprünglichen Lage der Speiche und der Oeffnung abhängen; und wann mehrere Speichen und mehrere Oeffnungen da sind, werden gleichzeitig auch mehrere Curven gebildet. Auch wird, wenn die beiden bezeichneten Bewegungen gleichförmig sind, allemal, wann die Speichen und Oeffnungen in dieselbe relative Lage zurückkehren, sich dieselbe Erscheinung wiederholen, was eben die Unbeweglichkeit dieser Curven bedingt. Die letzteren lassen sich leicht geometrisch construiren und auch durch Gleichungen ausdrücken, wie dies von Roget geschehen ist*).

In ähnlicher Weise beruhen auf der Fortdauer des Lichteindrucks die Erscheinungen, welche das von Plateau**) angegebene Anorthoskop gewährt.

Beiläufig erwähnen wir hier einer Erscheinung, die Plateau***) durch zwei Scheiben von steifem Papier hervorbrachte, von denen die eine 30, die andere 33 Centim. Durchmesser hatte. Jene ist

---

*) Weiteres über diese und verwandte Erscheinungen findet man bei Faraday: Poggend. Ann. Bd. XXII. S. 601, Plateau: ebend. Bd. XX. S. 330, Emsmann ebenda Bd. LXIV. S. 326, u. Bd. XCI. S. 618.

**) Poggend. Ann. Bd. XXXVII. S. 464, Bd. LXXVIII. S. 563, Bd. LXXIX. S. 269, u. Bd. LXXX. S. 150 u. 287.

***) Poggend. Ann. Bd. LXXVIII. S. 563.

in acht gleiche Sectoren getheilt, von welchen je zwei gegenüberstehende gleich gefärbt sind, nämlich roth, schwarz, blau und weiss, während die andere schwarz ist und zwei Ausschnitte hat, die nur bis auf 3 Centim. zum Umfange gehen, von dem Mittelpunkte 2 Centim. abstehen und eine Winkelbreite haben, die nur $\frac{3}{4}$ von der der bemalten Sectoren beträgt. Bewegt sich nun die bemalte Scheibe hinter der ausgeschnittenen und ist nur eine geringe Differenz in der Geschwindigkeit beider, so geht das Blau und Roth von der schwächsten Nüance bis zum vollen Farbenton allmälig über und nimmt dann eben so wieder ab.

Und endlich sei auch noch einer von Talbot*) und Poggendorff**) hervorgehobenen Erscheinung gedacht, die sich ebenwohl aus der Fortdauer des Lichteindrucks erklärt. Man befestige an der Rückseite eines Spiegels, der sich in rasche Rotation um eine Axe versetzen lässt, einen Draht und biege ihn nach vorn, dergestalt, dass sein vorderes Ende mit der besagten Axe des Spiegels parallel läuft. Dieses Drahtende ist nun im rotirenden Spiegel nicht sichtbar; man sieht es aber, sobald man in der Entfernung von einigen Fussen vor dem Spiegel eine brennende Kerze aufstellt, deren reflectirtes Bild im Spiegel einen Lichtpunkt gewährt. Indem nämlich der Draht bei jedem Umlaufe des Spiegels einmal vor der Kerzenflamme vorbeigeht und seinen Schatten in den Spiegel wirft, bleibt der Gesichtseindruck von einem Vorübergange bis zu dem nächstfolgenden; daher der Draht an derselben Stelle sichtbar bleiben muss.

314. Mit der bereits besprochenen Thatsache, dass die längere Dauer einer Lichteinwirkung eine Ermüdung des Sehorgans für die betreffende Farbe herbeiführt, stehen in einer gewissen Beziehung diejenigen Licht- und Farbenerscheinungen, welche man gewöhnlich als subjective oder zufällige bezeichnet. Dieselben gehören im Allgemeinen zu den Nachbildern, die im Gesichtsfelde auftauchen, wenn die Retina eine gewisse Zeit hindurch einer Lichteinwirkung von bestimmter Art ausgesetzt war.

Eine der gewöhnlichsten hierher gehörigen Erscheinungen ist folgende. Wenn man in einem Zimmer einige Zeit scharf auf ein gegen den hellen Himmel gerichtetes Fenster sieht und dann das

---

*) Lond. and Edinb. Phil. Mag. N. XX. p. 113.
**) Annal. Bd. XXXII. S. 649.

Auge gegen eine weisse Fläche richtet, so erblickt man die Fensterrahmen hell und die Zwischenräume dunkel, während sonst die Fensterscheiben hell, die Rahmen dagegen dunkler erscheinen. Den Grund dieser Erscheinung hat man darin gefunden, dass diejenigen Netzhautstellen, welche von dem hellen durch die Fensterscheiben gegangenen Lichte getroffen wurden, weniger empfänglich für das weisse Licht der Wand seien als solche Stellen der Netzhaut, auf welche das Bild der dunkleren Fensterrahmen gefallen war; daher der eigentliche Erklärungsgrund hier der ist, dass das Auge durch einen etwas starken oder andauernden Lichteindruck für einen nachfolgenden derselben Art eine Zeitlang unempfindlich oder doch minder empfänglich gemacht wird. Gleichfalls hierher gehört eine auch von Göthe*) erwähnte Erscheinung. Hält man nämlich ein schwarzes Bild, etwa eine schwarze Papierscheibe, vor eine graue Fläche und sieht eine Weile unverwandt, indem es hinweggenommen wird, auf denselben Fleck, so erscheint der Raum, den es einnahm, um vieles heller. Wenn man aber auf eben diese Weise ein weisses Bild hinhält, so wird der Raum nachher dunkler als die übrige graue Fläche erscheinen.

315. Aehnliches nun, wie in Bezug auf Schwarz und Weiss, findet auch statt, wenn man farbige Gegenstände auf einem weissen oder schwarzen Grunde betrachtet, worüber bereits Buffon**) genauere Versuche anstellte.

Man lege ein seidenes Band von irgend einer reinen und lebhaften Farbe oder auch einen ähnlichen farbigen Papierstreifen auf ein schwarzes von der Sonne beleuchtetes Papier. Sieht man nun den farbigen Gegenstand eine Zeitlang scharf an, so scheint die Intensität seiner Farbe allmälig etwas abzunehmen, und wenn man dann das Auge gegen eine weisse Fläche richtet, erblickt man ein Bild des Gegenstandes, das aber die Complementär- oder Contrastfarbe von der des Gegenstandes hat. So ist für ein rothes Object dieses subjective Bild grün, und umgekehrt. Liegt das farbige Object, z. B. ein rosenrothes Band, auf einem weissen von der Sonne beschienenen Papier, so gewahrt man bald, dass der zugleich mit im Gesichtsfelde des Auges liegende Theil des weissen Papiers farbig erscheint, und zwar so, dass er die Complementärfarbe von

*) Farbenlehre, didaktischer Theil. §. 37.

**) Mém. de l'acad. de sc. à Paris 1748. p. 152.

der des Bandes, also in unserem Beispiel die grüne Farbe zeigt. Diese Färbung erscheint dicht am Rande des farbigen Bandes sehr lebhaft, und rührt daher, dass das von dem Rande ausgehende weisse Licht Netzhautstellen trifft, die von den rothen Strahlen afficirt waren. Zieht man das Band von dem weissen Papier hinweg, so erscheint die ganze Fläche, die vorher von dem Bande bedeckt wurde, in der bezeichneten Complementärfarbe.

Splittgerber*) bemalte den gläsernen, mattgeschliffenen Schirm einer Lampe an mehreren Stellen mit verschiedenen Farben, und verminderte die Flamme bis zum Auslöschen, wo dann in dem Moment vor dem gänzlichen Erlöschen von jeder Farbe die complementäre erschien. Eine besondere Vorrichtung zur Wahrnehmung subjectiver Farben hat Schaffgotsch**) unter dem Namen „Diploskop" angegeben. Dasselbe besteht aus einer drehbaren Scheibe, welche zur Hälfte roth, zur Hälfte grün bemalt ist, und die durch zwei vor die Augen gehaltene Röhren so betrachtet wird, dass das eine Auge nur rothes und das andere nur grünes Licht aufnimmt, so lange bis der betreffende Eindruck sich abgestumpft hat. Wird dann die Scheibe in schnelle Drehung versetzt, so sieht das Auge, welches bisher das Roth wahrgenommen, nur Grün, und das andere, welches den Eindruck des Grünen aufgenommen, nur Roth. Hieran schliessen sich einige Versuche von Dove***). Bei denselben wurde aber der Netzhaut, nachdem dem Auge zuerst zwei Farben dargeboten waren, der Eindruck der einen Farbe plötzlich entzogen, wo sich dann an dieser Stelle die andere Farbe in grösster Lebhaftigkeit darstellte. Auf einem schnell rotirenden Farbenkreisel befand sich eine Scheibe, welche einen gelben und blauen Sector im Grössenverhältniss von 1:4 enthielt. Dove bewegte nun ein dunkles Stäbchen von der Dicke eines dünnen Bleistiftes über die in gleichförmiger Mischfarbe erscheinende Scheibe parallel mit sich selbst fort, und sah den Stab als ein Stabgitter mit abwechselnd blauen und gelben äusserst lebhaft gefärbten Speichen. Die grössere Breite der gelben Speichen zeigte zugleich, dass, wenn der Stab Blau verdeckte, man Gelb sah, so wie er hingegen über Gelb wegging, Blau.

*) Poggend. Ann. Bd. XLIX. S. 587.

**) Poggend. Ann. Bd. LIV. S. 193.

***) s. Poggend. Ann. Bd. LXXI. S. 112, 227, auch Bd. LXXV. S. 526.

316. Complementäre Farbenerscheinungen subjectiver Art nimmt man auch sehr deutlich bei den sog. farbigen Schatten wahr. ‚Wenn auf einen undurchsichtigen Körper von zwei verschiedenen Seiten her Licht fällt, so wirft derselbe zwei Schatten, von denen der eine von den Strahlen des einen Lichtes, der andere dagegen nur von den Strahlen der zweiten Lichtquelle beleuchtet wird. Ist nun das eine Licht weiss, das andere farbig, z. B. roth, so erscheint der von dem letzteren beleuchtete Schatten in der Farbe dieses Lichtes, der andere hingegen in der entsprechenden Contrastfarbe, also grün. Man stelle in der Dunkelheit zwei brennende Kerzen nebeneinander und davor einen dünnen aufrechten Stab, so dass auf einer weissen Fläche zwei Schatten entstehen. Hält man nun vor das eine Licht ein farbiges Glas dergestalt, dass die weisse Fläche gefärbt erscheint, so wird man den von dem farbigen Lichte herrührenden, und von dem farblosen Kerzenlichte beleuchteten Schatten in der betreffenden Completärfarbe sehen*). Auch gehören hierher die blauen und gelblichen Schatten, wenn ein Gegenstand gleichzeitig von Kerzen- und Mondlicht beleuchtet wird. Der Schatten des Kerzenlichtes erscheint complementär blau. Die subjective Natur des complementär gefärbten Schattens lässt sich in besonderen Fällen bestimmt darthun, insofern man nämlich nachweisen kann, dass er unter Mitwirkung des benachbarten farbigen Lichtes zu Stande kommt**).

In bequemer Weise lassen sich die complementär gefärbten Schatten auch darstellen, wenn man Lichtstrahlen durch ein farbiges Glas auf eine weisse Fläche fallen lässt, die dann natürlich in der Farbe des Glases erscheint, und nun gerade zwischen dem Glase und der von ihm beleuchteten weissen Fläche einen schmalen, undurchsichtigen Stab aufstellt. Der letztere wirft dann auf die weisse Fläche einen Schatten, welcher durch das ringsum verbreitete weisse Tageslicht erhellt ist, und der stets complementär zur Farbe des Glases erscheint, also roth, wenn das Glas grün ist, u. s. w.

---

*) Göthe's Farbenlehre, didaktischer Theil §. 68.

**) s. über diese Schatten Fechner in Poggend. Ann. Bd. XLIV. S. 137, 221, 229, u. Bd. XLV. u. L. S. 133; auch Pohlmann ebenda Bd. XXXVII. S. 319. — Ferner Dove, Darst. der Farbenlehre etc. Berlin 1853. S. 274, u. Ragona Scina in Raccolta fisico-chimica del Zantedeschi. II. p. 207.

317. Die bisher betrachteten subjectiven Farbenerscheinungen erklärt man sich gewöhnlich auf eine Weise, die wir schon oben in Bezug auf Schwarz und Weiss hervorgehoben haben, und die wohl in bestimmter Form zuerst von Scherffer*) ausgesprochen ist. Wenn die Netzhaut durch anhaltendes Wahrnehmen einer bestimmten Farbe für diese abgestumpft ist, so wird dieselbe bei nun einfallendem (alle Farbestrahlen in sich vereinigenden) weissen Lichte nicht für die jene Farbe hervorrufenden Strahlen empfänglich sein, sondern nur für die übrigen Farbenstrahlen, welche die betrachtete Farbe zu Weiss ergänzen. Sieht man also einen rothen Streifen auf einem von der Sonne beleuchteten Papier eine Zeitlang scharf an und wendet dann das Auge gegen eine weisse Fläche, so erscheint der Streifen grün, weil hier die Netzhaut für die rothe Farbe abgestumpft ist und demnach, gegen die weisse Fläche gerichtet, nur noch den Gesammteindruck derjenigen Farben aufnehmen kann, welche nach Wegnahme der rothen Strahlen übrig bleiben; dies gibt aber die grüne Farbe. Und in ganz ähnlicher Weise verhält es sich mit den anderen complementär gefärbten Nachbildern.

Auch die complementär gefärbten Schatten erklärt man sich insgemein nach dieser Ansicht, indem man annimmt, dass das Auge für das farbige Licht, welches den vom weissen Lichte beleuchteten Schatten umgibt, abgestumpft sei und daher nur noch den Gesammteindruck aller derjenigen Farbenstrahlen aufnehme, welche im weissen Lichte nach Ausschluss jenes farbigen Lichtes zurückbleiben, woraus dann eben die complementäre Farbe des von weissem Lichte beleuchteten Schattens resultire. Indessen dürfte diese Erklärung nicht für alle hierher gehörigen Fälle giltig sein. Wahrscheinlich beruht die Entstehung des subjectiv farbigen Schattens, wenigstens in manchen Fällen, auf Umständen, die wir später unter den Contrasterscheinungen aufführen werden, und zwar, wie wir gleich hier hervorheben wollen, auf einer Umstimmung, die im Sensorium durch das gegebene farbige Licht bewirkt wird, — auf einer besonderen Stimmung, die es mit sich bringt, dass das vom Schatten kommende neutrale (weisse Licht) den Eindruck einer bestimmten Farbe macht**).

---

*) Journ. de Physique de Rozier, tom. XXVI, année 1785.

**) s. Brücke in Poggend. Ann. Bd. LXXXIV. S. 428.

318. Gegen diese fast allgemein angenommene Erklärungsweise wurden jedoch Bedenken erhoben, namentlich von Plateau*), Lebot**) und Osann***), welche ausser anderm besonders geltend machten, dass man auch auf schwarzem Grunde ein complementäres Nachbild wahrnehme. Dieser Einwurf wurde indess von Fechner †) durch Hinweisung auf die Thatsache abgelehnt, dass auch vom tiefsten Schwarz noch weisses Licht reflectirt wird. Weiter hat man aber gegen die obige Erklärungsweise eingewendet, dass nach ihr die abwechselnden Erscheinungen des ursprünglichen Eindrucks und des zufälligen Bildes nicht zu begreifen seien. Es kommt nämlich vor, dass das complementäre Bild plötzlich verschwindet und dann in seinem früheren Glanze wieder hervortritt, wobei auch zuweilen die Farbe des Gegenstandes wieder erscheint, um mit der complementären zu wechseln. Doch hat Fechner darauf aufmerksam gemacht, dass jede Bewegung des Auges oder der Augenlider, ja selbst eine Bewegung des übrigen Körpers, dem Anscheine nach Alles, was die Gleichförmigkeit des Gefäss- und Nerveneinflusses auf das Auge stört, das Nachbild zum Verschwinden disponire, dass sich dasselbe indess in kurzer Zeit bei fixirt gehaltenem Auge wieder belebe. Woher aber der Wechsel zwischen dem complementären Nachbilde und der ursprünglichen Farbe, worauf Plateau seinen Einwurf vorzugsweise stützt? Um diesen Wechsel wahrzunehmen, kann man, nach Plateau, durch eine 0,5 Meter lange, 3 Centimeter weite und inwendig geschwärzte Röhre auf ein gut beleuchtetes rothes Papier, das über die Ränder der Röhre hinlänglich hinausragt, etwa 1 Minute lang sehen, während man das andere Auge mit einem Taschentuche bedeckt, um dasselbe gegen das Eindringen des Lichtes genügend zu sichern. Nimmt man hierauf, während dieses Auge verschlossen bleibt, die Röhre hinweg, so gewahrt man auf der weissen Wand oder Decke des Zimmers ein kreisförmiges Bild,

---

*) Ann. de chim. et phys. T. LIII. p. 386; — Poggend. Ann. Bd. XXXII S. 543, Bd XXXVIII. S. 626.

**) Ann. de sciences d'observ. par Saigey et Raspail. T. III. p. 8; — s. auch Fechner's Repertorium der Physik. Bd. II. S. 228.

***) Poggend. Ann. Bd. XXVII. S. 694; Bd. XXXVII. S. 287; Bd. XLII. S. 72.

†) Poggend. Ann. Bd. XLIV. S. 221, 673; Bd. L.

das zuerst grün erscheint, bald darauf roth, dann wieder grün und hiernach wieder roth wird. Plateau und Quetelet beobachteten auf diese Weise vier successive Abwechselungen. Reflectirt man nun auf diese Erscheinung etwas genauer, so erkennt man bald, dass sie eigentlich nicht gegen die gewöhnliche Erklärungsweise der subjectiven Farben angeführt werden kann. Wenn man das für eine bestimmte Farbe, z. B. für Roth, abgestumpfte Auge auf eine weisse Fläche richtet, so wird es den Gesammteindruck aller im weissen Lichte noch übrigen Farbenstrahlen empfangen, also hier den des Grünen. Nun kann dasselbe, wie für die ursprüngliche Farbe, so auch für die jetzt sich darbietende grüne Farbe nach einer gewissen Zeit seine Empfänglichkeit verlieren, und damit zugleich wieder empfänglich werden für die von der weissen Fläche kommenden rothen Strahlen, und so innerhalb gewisser Grenzen abwechselnd weiter. Der gewichtigste Einwurf, welchen Plateau gegen diese Theorie hervorgehoben, bleibt der, dass man nach dem Betrachten eines farbigen Gegenstandes auch bei gänzlicher Abwesenheit des weissen Lichtes im völlig verschlossenen Auge ein complementäres Nachbild wahrnehme.

In Bezug hierauf stellte Fechner*) folgenden Versuch an. Eine monochromatische Lampe, wozu einfach eine Untertasse voll Baumwolle diente, welche letztere durch und durch mit Kochsalz eingerieben und dann mit Weingeist befeuchtet war, wurde in das mit einer Oeffnung im Fensterladen versehene finstere Zimmer gesetzt, das Loch mit einem gelben Glase verdeckt, und durch dasselbe eine Zeit lang mit fest darauf fixirten Augen nach dem Himmel gesehen. Der primäre gelbe Farbeneindruck, den die gelbe Oeffnung gewährt, ruft einen complementären violetten hervor, welcher sich nach Abwendung von dem Loche, vollkommen deutlich auf einer weissen Tafel, die, im finstern Zimmer stehend, blos von dem homogenen gelben Licht erleuchtet wird, darstellt, selbst auch dann, wenn man das Loch im Laden nun ganz schliesst, damit nicht das gelbe Glas (als nicht ganz homogen gefärbt) noch etwas fremdes Licht durchlasse.

In Folge dieses Versuches fand sich Fechner veranlasst, die gangbare Theorie der zufälligen Farben etwas zu modificiren. Die Netzhaut, sagt er, wird an den Stellen, wo sie eine Zeit lang

*) Poggend. Ann. Bd. XLIV. S. 516 ff.

einen gewissen Farbeneindruck erfahren oder eine gewisse Farbenreaction geäussert hat, für einige Zeit nachher unfähiger, auf das Ursächliche dieser Farben zu reagiren, dagegen desto fähiger, diejenige Farbenreaction zu äussern, hinsichtlich deren sie unthätig war und ausgeruht hat, sei übrigens das Ursächliche, was das Auge zur Farbe anregen will, in oder ausser dem Auge. Hierdurch soll sich, in Uebereinstimmung mit der obigen gewöhnlichen Ansicht, erklären, wie das an sich zur Lichtentwickelung fähige, ja stets in einiger Lichtentwicklung begriffene Auge, auch wenn gar kein äusseres Licht mehr in dasselbe eindringt, doch die Complementärfarbe entwickeln kann. Nach dieser Ansicht Fechners wird also dem im Auge selbstthätig entwickelten Lichte oder vielmehr einer von Innen heraus angeregten Lichtempfindnng ein bestimmter Antheil an der Erscheinung der Complementärfarben zugeschrieben. Doch soll diese Lichtentwicklung nicht erst als überhaupt hervorgerufen durch den vorigen primären Eindruck betrachtet werden, sondern als beständig im Auge vorhanden und nur erhöht oder vermindert, je nachdem das organische Vermögen dazu durch vorherige Ruhe oder stark objective Nöthigung zu derselben Entwicklung gestärkt oder erschöpft ist.*)

Dass zum Hervortreten der Complementärfarbe nicht durchaus die Einwirkung des äusseren weissen Lichtes erforderlich ist, folgt schon daraus, dass diese Farbe, wie auch Fechner angibt, sich gleichzeitig mit dem primären Farbeneindrucke geltend macht, also bereits während man das farbige Object noch betrachtet, daher sich denn dieses auch, bei starker Beleuchtung oder längerem Anschauen, mit einem grauen Schleier überzieht.

319. Eine zweite Ansicht der subjectiven Farbenerscheinungen beruht auf einem Princip, das namentlich von Plateau**) und in anderer Weise von Brewster***) hervorgehoben wurde. Hiernach soll die Retina, ohne besondere Rücksicht auf eine Ermüdung derselben, durch den primären Farbeneindruck in secundäre Erregungszustände, die dann den besagten Farbenerscheinungen zum Grunde liegen, versetzt werden. Die Retina befindet sich für

*) s. Fechner a. a. O.

**) Essai d'une Theorie generale comprenant l'Ensemble des apparences visuelles, etc. Brux. 1834; — Ann. de Chim. et Phys. T. LVIII. p. 337.

***) Phil. Magaz. 1834. T. IV. p. 354.

je zwei complementäre Farben gewissermassen in entgegengesetzten Zuständen, in der Art, dass dieselbe, durch eine bestimmte Farbe angeregt, nun selbst das Bestreben in sich trägt, in den entgegengesetzten Zustand überzugehen. Ist also ein Theil der Retina durch Einwirkung gewisser Farbestrahlen aus dem gewöhnlichen Zustande herausgetreten, so dauert der anfängliche Eindruck nach Wegfall der äusseren Ursache noch eine Zeit lang fort, natürlich mit abnehmender Intensität, bis der normale Zustand wieder erreicht ist. Hiermit tritt jedoch noch keineswegs Ruhe ein, sondern der betreffende Theil der Netzhaut geht nun in den entgegengesetzten Zustand über, wobei dann das complementäre Nachbild zum Vorschein kommt. Alsdann nimmt dieser letztere Zustand wieder ab, um dem anfänglichen Platz zu machen, etc., so dass der afficirte Theil der Netzhaut durch eine Reihe solcher Schwingungen, deren Zahl und Intensität nach den Umständen verschieden ist, in den Zustand der Ruhe zurückkehrt.

Schon ein Blick auf die bisher besprochenen subjectiven Farbenerscheinungen genügt, um zu erkennen, dass dieser Ansicht eine gewisse Gültigkeit nicht abgesprochen werden kann, während es andrerseits doch auch eben so sicher ist, dass die oben besprochene ältere Ansicht ein Moment hervorhebt, das bei den in Rede stehenden Erscheinungen zu beachten ist. Es ist nicht zu verkennen, dass durch den Ausdruck „Ermüdung oder Abstumpfung der Retina" auf ein Factum hingedeutet wird, das bei dem Auftreten der besagten Erscheinungen zur Geltung kommt. Und neuerdings hat denn auch Brücke*) auf Grund seiner Untersuchungen über subjective Farben gezeigt, dass jedes der hervorgehobenen Principe seine Berechtigung habe, obwohl keines als gemeinsamer Ausgangspunkt zur Erklärung aller hierher gehöriger Erscheinungen benutzt werden könne.

320. Die Nachbilder lassen sich füglich in zwei Abtheilungen bringen, und zwar kann man mit Brücke, zweckmässig die der einen positive, die der andern negative nennen, indem man mit diesen Ausdrücken denselben Sinn verbindet, welchen man ihnen dermalen in der Photographie unterlegt. Hiernach ist ein positives Nachbild ein solches, in welchem das hell, was im Object

*) Berichte der kais. Akademie der Wissens. in Wien, 1851; — Poggend. Ann. Bd. LXXXIV. S. 418.

hell, und das dunkel, was im Object dunkel ist; wogegen dasjenige Nachbild negativ ist, bei welchem das hell, was im Object dunkel ist, und umgekehrt. — Die negativen Nachbilder fallen nun, nach Brücke, dem Erklärungsprincipe von Scherffer anheim, die positiven aber dem von Plateau, und man könnte, wie Brücke sagt, die ersteren deshalb als Nachbilder wegen verminderter Erregbarkeit, letztere als Nachbilder wegen abnorm gesteigerter Erregung der Nervenhaut bezeichnen, wie denn auch schon Darwin *) einen solchen Unterschied gemacht, aber nicht richtig durchgeführt habe.

Gesetzt nun, man betrachte ein helles Object, etwa eine weisse Scheibe, auf dunklem Grunde und es erschiene dann in dem geschlossenen, vor allem äussern Lichte geschützten Auge ein positives Nachbild, so wird dieses, wenn von Neuem weisses Licht in das Auge fällt, in ein negatives Nachbild übergehen, indem diejenigen Netzhauttheile, auf welche das Bild des dunklen Grundes fiel, jetzt durch das äussere Licht stärker afficirt werden, als die Netzhauttheile, welche noch durch den vorherigen Eindruck des weissen Objects erregt sind. Wenn dagegen das Nachbild des weissen Objects auf schwarzem Grunde im geschlossenen Auge negativ erscheint, wird dasselbe bei erneuertem Zutritt weissen Lichtes noch entschiedener, als negatives, auftreten, weil jetzt die dunklen ermüdeten Partien (der Retina), auf welche zuvor das Bild des weissen Objects fiel, weniger Empfänglichkeit für das objective Licht besitzen, als die helleren Partien, auf welchen sich beim Anblick des wirklichen Objects der dunkle Grund darstellte.

Sonach können wir sagen, dass das negative Nachbild durch eine wirkliche Abstumpfung (Ermüdung), das positive dagegen durch eine fortdauernde Erregung der betreffenden Retinatheile bedingt sei, und zwar durch eine Erregung, die sich dem Zustande der Ermüdung annähert, daher die bezüglichen Retinatheile dem neu eindringenden äusseren Lichte eine geringere Empfänglichkeit darbieten.

321. Diese Unterscheidung zwischen positivem und negativem Nachbilde passt auch bei rein farbigen Objecten, so bei je-

*) New experiments on the ocular spectra of light and colours. Philosophical Transact. 1786. V. LXXVI, p. 313.

nem bereits hervorgehobenen Wechsel zwischen der Empfindung der ursprünglich angeschauten Farbe und ihrer complementären.

Brücke sah durch ein grünes Glas in die helle Mittagssonne, bedeckte dann die Augen sorgfältig mit den Händen und wandte sie vom Lichte ab. Nach kurzer Zeit bemerkte er ein blendend helles grünes Bild der Sonne auf dunklem Grunde. Nachdem dieses positive Bild eine Zeit lang gesehen worden, verschwand es und machte auf kurze Zeit einem tief purpurrothen Felde, dunkler als der Grund, nämlich einem negativen complementär gefärbten Bilde Platz; dann aber erschien es wieder, und dieser Wechsel dauerte längere Zeit in der Weise fort, dass das positive Bild jedesmal während eines längeren Zeitintervalls gesehen ward als das negative; endlich blieb das positive Bild, nachdem es immer schwächer geworden, ganz aus. Das negative wurde noch einige Zeit gesehen, dann verschwand auch dieses und die ganze Erscheinung hatte ein Ende. — Nach dem Anschauen der Sonne durch ein rothes Glas stellte sich bei völlig bedeckten Augen ein rothes positives Nachbild ein, welches mit einem negativen grünen (dunkleren als der Grund) ebenso abwechselte, wie vorher das positive grüne mit dem negativen rothen. Der Uebergang vom positiven zum negativen Bilde fand immer auf eine und dieselbe Weise statt. Das positive Bild zeigte sich nämlich umgeben von einem schwach complementär gefärbten Hofe, der dunkler war als der übrige Grund. Von diesem Hofe aus verbreitete sich die complementäre Farbe centripetal über das positive Bild unter gleichzeitiger Verdunklung desselben. Trat das positive Bild wieder auf, so erschien die primäre Farbe zuerst in der Mitte des dunklen Bildes und breitete sich von dort centrifugal aus.

Nun wird auch hier das negative Bild deutlicher, wenn man, sobald es bei geschlossenen Augen hervorgetreten ist, die Hände, welche die Augen bedecken, etwas lüftet und damit einiges Licht in die letzteren gelangen lässt; wogegen unter denselben Umständen das positive Nachbild dunkler wird, so dass es, wenn man die Augen öffnet und das Bild auf einen weissen Grund projicirt, dunkel auf demselben erscheint. Dieses Bild ist dann complementär gefärbt zu dem hellen Bilde im verfinsterten Auge. Dasselbe ist nunmehr negativ, unterscheidet sich aber, nach Brücke*), noch

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXIV. S. 440 f.

wesentlich von einem gewöhnlichen negativen Nachbilde. Das letztere ist nämlich, mag es übrigens im verfinsterten Auge, auf einem schwarzen oder weissen Grunde angeschaut werden, complementär gefärbt zu dem Objecte, von welchem es herrührt; dagegen ist das durch Projection auf einen weissen Grund aus einem positiven in ein negatives verwandelte Nachbild complementär zu jenem positiven Nachbilde gefärbt.

So erscheint das rothe Nachbild, welches man durch Anschauen der Sonne durch ein rothes Glas erhält, auf einen weissen Grund projicirt, grün, und das grüne, durch Anschauen der Sonne durch ein grünes Glas erhaltene Nachbild roth, wenn es auf einen weissen Grund projicirt wird. Diese Bilder sind wirklich complementär gefärbt zum Objecte, aber nur darum, weil hier das positive Nachbild die Farbe des Objects zeigte. Wenn man, nachdem man mit freiem Auge in die Sonne gesehen, und von ihr ein grünes positives Nachbild hat, dasselbe auf einen weissen Grund projicirt, so wird es in ein negatives rothes verwandelt. Oeffnet man die Augen, während das positive Bild blau erscheint, so zeigt sich auf dem weissen Grunde ein negatives orangefarbenes. Brücke erhielt von der vorherrschend gelben Flamme seiner Glasbläserlampe nach längerem Arbeiten an derselben ein sehr andauerndes positives grünes Nachbild mit rothem Rande und projicirte es auf einen weissen Grund; es ward dann negativ und roth mit grünem Rande, beim Schliessen der Augen aber wieder positiv und grün mit rothem Rande; und diesen Wechsel konnte derselbe mehrmals hintereinander sich mit der grössten Regelmässigkeit wiederholen sehen.

322. Die bisher betrachteten complementär gefärbten Nachbilder waren alle negative. Es gibt aber, nach Brücke*), auch positive zum Object regelmässig complementäre Nachbilder, die nach demselben allemal dann eintreten, wenn ein lebhaft gefärbtes und einigermassen intensives Licht in die Augen gefallen ist. Sie entstehen sofort nach dem Aufhören der Einwirkung dieses Lichtes und treten fast unmittelbar an die Stelle des primären Bildes, wogegen die negativ complementären immer erst nach einiger Zeit zur Erscheinung kommen. Von den letzteren unterscheiden sich die positiv complementären auch noch durch ihre kurze Dauer,

*) a. a. O. S. 442 f.

welche in der Regel nur nach Bruchtheilen einer Secunde zu messen ist, während die der negativen nicht selten Minuten überschreitet. — Man kann diese positiven complementären Nachbilder nach einem einfachen von Brücke angegebenen Verfahren sicher beobachten. Zu diesem Behufe nimmt man ein rothes Glas und betrachtet durch dasselbe eine Zeitlang eine helle Lichtflamme, nachdem man sich derselben bis etwa neun Zoll genähert hat; hierauf schliesst man die Augen, ohne den Augapfel mit den Augenlidern zu drücken, wo man dann in dem Moment, wo dies geschehen ist, eine schöne grüne Flamme sehen wird. Die Lichtstärke derselben ist kaum geringer, als die der objectiv gesehenen rothen, ihre Begrenzungen sind scharf und die helleren und dunkleren Partien in ihr deutlich, und in demselben Sinne wie in der objectiv angeschauten Flamme gezeichnet.

Nach dem Bisherigen ist nun die vollständige Reihe der Nachbilder, welche nach Einwirkung eines intensiven homogenen Lichtes eintreten, auf Grund der Brücke'schen Beobachtungen folgende: „Zuerst und fast unmittelbar beim Erlöschen des primären Lichteindruckes entsteht ein meist momentanes positives complementär gefärbtes Nachbild; dann folgt, nach einer Pause, das erste positive identisch gefärbte Nachbild, hierauf ein negatives complementär gefärbtes, welches wieder einem positiv identisch gefärbten Platz macht. — Dieser Wechsel wiederholt sich nach Umständen mehr oder weniger oft; dann bleibt das positive identisch gefärbte Bild aus, und es wird nur noch das negative complementäre gesehen, bis endlich auch dieses gänzlich verschwindet."

323. Die unter dem Namen des Abklingens der Farben bekannte Erscheinung besteht darin, dass nach einem Blick in die helle Sonne oder nach dem Anstarren einer Lichtflamme oder überhaupt eines sehr hellen Objects im Auge eine Reihenfolge von Farben auftritt, die in einem gegebenen Falle in bestimmter Weise verlöschen. Die umfassendsten Versuche über den Verlauf dieser Erscheinung wurden von Fechner angestellt. Einiges darüber findet man auch bei Darwin *), Purkinje **) und Göthe ***). Purkinje sah 12 bis 60 Secunden lang in eine Kerzenflamme und

*) Philos. Transact. T. LXXVI. p. 330.

**) Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Bd. I. S. 97.

***) Farbenlehre, Bd. I. S. 15.

bedeckte darauf das Auge schnell mit den Händen. Im ersten Moment erblickte er noch das Flammenbild in seiner ursprünglichen Art. Doch verschwand dasselbe sehr rasch von Aussen nach Innen und machte einem gelben Bilde Platz. Dieses dauerte länger als das vorige und verschwand dann auf gleiche Weise, worauf ein rothes an seine Stelle trat, welchem succesiv in derselben Weise ein blaues, ein mildweisses und ein schwarzes Farbenbild folgte, und zwar so, dass jedes später erscheinende immer länger stehen blieb, als jedes vorhergehende, bis auf das schwarze, das am längsten stand und endlich von einem grauen Scheine, der die ganze Erscheinung umgab, verschlungen wurde. Die farbigen Flammenbilder traten nicht nach dem Verlöschen des vorhergehenden auf, sondern während das eine sich nach dem Mittelpunkte zusammenzog, erschienen an den Rändern schon die folgenden Farbenbilder einander überragend und mit abnehmender Geschwindigkeit sich nach dem Mittelpunkte ziehend.

Fechner*) stellte seine auf dieses Phänomen bezüglichen Versuche unter verschiedenen Umständen an. In Uebereinstimmung mit Purkinje fand er, dass jede spätere Phase des Phänomens länger als die vorhergehende dauert, so wie auch, dass stets ein den Grund überlaufender Schein die ganze Erscheinung gewissermassen verschlingt. In Hinsicht auf die Einzelnheiten des Phänomens benutzte Fechner besondere Bezeichnungen. So nennt er eine Nuancirung der Farbe des Nachbildes am Rande, welche vom Nachbilde selbst nicht deutlich abgegrenzt ist, sondern nach Innen sich in dieses verläuft, Saum; einen nach Innen und Aussen abgegrenzten Ring von erheblicher Breite um das Nachbild, und zwar von anderer Farbe als dieses, Umring; eine vom Nachbilde oder einem Umringe desselben sich mit abnehmender Intensität in den Grund hinein verlaufende, mehr oder weniger verbreitete, Färbung oder Hellung, — Randschein. Bei Entwickelung eines Umringes um einen centralen Theil des Nachbildes sind die Farben desselben immer solche, die später der centrale Theil selbst annimmt, indem die Farbe des letzteren gleichsam erlischt und dann die Farbe des Umringes seinen Raum mit erfüllt. Die verschiedenen Umringe, deren Farben successiv im centralen Theile erscheinen werden, entwickeln sich selbst auch successiv einer um den an-

*) Poggend. Ann. Bd. L. S. 445.

dern. Oft sind deren mehrere zugleich sichtbar, indem ein späterer Umring sich schon entwickelt, ehe die Farbe des vorigen central geworden ist. Verlischt das Phänomen schon, ehe die Farbe eines Umringes central wurde, so lässt sich annehmen, dass bei gehöriger Intensität sich noch eine centrale Phase in der Farbe des Umringes entwickelt haben würde. Manchmal kann durch eine leichte Bewegung der Augenlider momentan eine spätere Phase hervorgerufen oder eine frühere zurückgerufen werden. — Je intensiver das Licht ist, durch welches die Nachbilder erzeugt werden, desto schöner, intensiver und langsamer verlaufen die Phasen des Nachbildes. Die Beobachtung der ersten, am schnellsten verlaufenden Phasen erfordert einen starken Lichteindruck.

324. Fechner beobachtete nun Blendungsbilder nach Betrachtung von Weiss auf Schwarz, oder von Schwarz auf Weiss, und auch nach dem Sehen durch farbige Gläser oder Flüssigkeiten in die Sonne. In dem zuerst erwähnten Falle bewirkte er die Blendungsbilder, indem er entweder eine kreisrunde Oeffnung von $17\frac{1}{2}$ Par. Linie Durchmesser im Laden eines finstern Zimmers, durch welche der mit weissen Wolken bedeckte Himmel betrachtet wurde, als Object benutzte, oder indem er eine nahe gleich grosse Scheibe weissen Papiers auf schwarzem Papier in directem Sonnenlichte (etwa 30 bis 60 Secunden lang) betrachtete, oder eine auf schwarzem Papier liegende Scheibe weissen Papiers durch Sonnenlicht, welches mittelst eines grossen Brennglases darauf concentrirt wurde, beleuchtete und fixirte, oder endlich die Sonne selbst bei meist weissdunstigem oder nur sehr hellblauem Himmel und nicht zu tiefem Stande, direct und momentan anschaute. Wurden dann die Augen geschlossen und überdies noch mit den Händen bedeckt, so war 1) das Nachbild noch w e i s s, ging aber schnell vorüber; dann folgte 2) ein l i c h t b l a u e s Nachbild mit grauem oder schwarzem Grunde, gleichfalls schnell vorübergehend, 3) folgte ein l i c h t g r ü n e s Bild mit rothgelbem Saume; 4) der d u n k e l r o t h e Umring wurde central, es entwickelte sich ein blauer Saum und daraus ein blauer Umring, um welchen sich ein weisslicher, mehr oder weniger grün nuancirter Randschein verbreitete, — lange anhaltend —; 5) eine d u n k e l b l a u e, bisweilen l i l a farbene Phase schloss die Erscheinung, indem sie in Schwarzgrün oder Blaugrün überging. — Sonach folgten die Farben in der Reihe: Weiss, Lichtblau, Grün, Roth, Dunkelblau aufeinander. Indess ist die

Reihenfolge im Abklingen der Farben bei verschiedenen Personen eine verschiedene *), und jedenfalls von individuellen Verhältnissen abhängig.

In Rücksicht der übrigen Versuche Fechner's, die dieses Phänomen noch zu ihrem Gegenstande haben, sei auf die citirte Abhandlung verwiesen, indem wir zugleich bemerken, dass ein Abklingen der Farben auch dann stattfindet, wenn man ein weisses von der Sonne beleuchtetes Object längere Zeit hindurch unverwandt anschaut.

325. Nach Brücke **) stellt sich das Phänomen des Abklingens durch verschiedene Farben nur bei nicht homogenem Lichte ein; das letztere muss ausser den Strahlen, die seine Farbe bestimmen, noch andere in beträchtlicher Menge enthalten, so dass der bezeichnete Farbenwechsel am vollständigsten bei weissem oder fast weissem Lichte beobachtet wird. Auch kommt, nach seinen Erfahrungen, das Abklingen der Nachbilder durch verschiedene Hauptfarben nur bei positiven Nachbildern vor. Als derselbe z. B. auf ein vom directen Sonnenlichte möglichst stark beleuchtetes weisses Feld auf dunklem Grunde hinreichend lange hin sah, erhielt er ein positives grünes Nachbild. Dieses ward, nachdem es einige Zeit gesehen worden, blau, violett und endlich tief roth. Alle diese Farben waren noch beträchtlich heller als der Grund; nachdem aber das Roth verschwunden, trat keine neue Farbe auf, das Feld blieb schwarz, dunkler als der Grund, und damit war das positive Nachbild in ein negatives übergegangen, welches noch einige Zeit gesehen wurde und dann verschwand. Allein nicht bei allen positiven Nachbildern tritt ein solcher Farbenwechsel ein. So hat Brücke ihn niemals an solchen gesehen, welche durch homogenes Licht erregt waren, sondern im Allgemeinen, wie schon oben bemerkt, um so stärker und vollständiger, je mehr sich das erregende Licht dem weissen näherte. Daher vermuthet Brücke, dass der besagte Farbenwechsel nur davon herrühre, dass die positiven Nachbilder der einzelnen das weisse Licht zusammensetzenden Farben zeitlich auseinander fallen, womit es denn auch zusammenhängen möge, dass die Farbenfolge beim Abklingen von den verschiedenen Beobachtern so sehr verschieden angegeben werde.

---

*) s. Szokalski, über die Empfindungen der Farben, Giessen 1842; — u. Volkmann in R. Wagner's Handw. der Physiol. Bd. III. Abth. 1. S. 313.

**) Poggend. Ann. Bd. LXXXIV. S. 438, 445.

326. Es ist bemerkenswerth, dass im Gesichtsfelde der Schein des Grünen veranlasst werden kann durch das rothe Licht, welches durch die Sclerotica und Chorioidea auf die Retina fällt, und diese relativ unempfindlich macht gegen die rothen Strahlen des durch die Pupille einfallenden weissen Lichtes. Brücke *) hat diesen Fall besonders hervorgehoben und aus dem Umstande abgeleitet, dass die Umhüllungen des innern Auges, tunica conjunctiva, sclerotica und chorioidea, keine vollkommen undurchsichtige Decke bilden, sondern noch eine bedeutende Menge von Licht durchlassen, namentlich bei blauen Augen, bei welchen bekanntlich auch die Chorioidea weniger stark pigmentirt ist. Das durch die genannten Umhüllungen dringende Licht bestrahlt, weil es trübe Medien durchdringt, nicht einen bestimmten Fleck der Netzhaut, sondern verbreitet sich diffus auf derselben. Auch kann dasselbe nicht ungefärbt sein, da es sowohl durch ein mehrfaches dichtes Netz von Blutgefässen als auch durch die Pigmentschicht der Chorioidea hindurchgegangen ist. Nun ist aber das Blut roth und das Chorioidalpigment des Menschen schön braun; daher wird das weisse Licht, welches nicht durch die Pupille, sondern von der Seite her durch die Sclerotica und Chorioidea in das Auge dringt, in demselben einen bräunlich rothen Schein verbreiten. Dieser rothe Schein macht aber, indem er dauernd über das innere Auge verbreitet ist, die Netzhaut relativ unempfindlich gegen das Roth des durch die Pupille einfallenden weissen Lichtes, so dass dieses unter Umständen den Eindruck von Grün gewähren muss.

In nächster Beziehung hiemit steht nachbeschriebener Versuch. Brücke stellte zu seiner rechten Hand eine gewöhnliche Studierlampe hin, dergestalt, dass das Licht derselben von der Seite her auf sein rechtes Auge fiel, während das linke vor demselben durch die Nasenwurzel geschützt war. Als er nun das auf einen weissen Grund projicirte Doppelbild eines schwarzen Gegenstandes betrachtete, erschien dasjenige Bild, welches dem linken Auge angehörte, mithin, wenn ein fernerer Gegenstand als das Object fixirt ward, das rechte Bild grün, das andere roth. Das Grün zog sich etwas ins Meergrün, das Roth in ein schmutziges Braunroth. Stellte Brücke die Lampe zu seiner linken Hand, so kehrte sich die ganze Erscheinung um. Brachte er aber die Bilder zur

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXIV. S. 421 f.

theilweisen Deckung, so erschienen sie da, wo sie sich deckten, schwarz.

Das Gelingen dieses Versuches erfordert, dass von dem schwarzen Objecte, welches das Doppelbild gewährt, kein Licht in die Augen reflectirt wird. Brücke benutzte gewöhnlich eine Scheibe aus schwarzem Steingut von etwa 1 Zoll Halbmesser, welche derselbe in der Weise schief hielt, dass von ihr das Licht der Lampe nicht in die Augen reflectirt werden konnte, und projicirte dann ihr Doppelbild auf einen etwas weiter entfernten weissen Grund.

Brücke bezeichnet diesen Versuch als die Umkehrung eines von Smith beschriebenen Experiments, dessen Brewster erwähne*), das aber bis daher noch keiner genauen Analyse unterworfen sei.

Wird während des obigen Versuches abwechselnd und rasch hintereinander das bestrahlte und das nicht bestrahlte Auge geschlossen, so erscheint der weisse Grund im ersteren Falle roth, im letzteren grün; woraus sich im Voraus entnehmen lässt, dass, wenn man das Doppelbild eines weissen Gegenstandes auf schwarzem Grunde betrachtet, das dem bestrahlten Auge zugehörige Bild grün, das andere roth erscheinen werde, was auch, nach Brücke, im Einklange mit der Angabe von Smith der Fall ist. Hiernach wird nun, wenn weisses Licht dem bestrahlten Auge grün, dem nicht bestrahlten roth erscheint, bei Betrachtung des Doppelbildes eines schwarzen Objects auf weissem Grunde das dem bestrahlten Auge angehörige Bild roth, das dem nicht bestrahlten angehörende grün erscheinen müssen, da im gemeinsamen Sehfelde an der Stelle des ersteren der Eindruck von Grün, an der des letzteren der Eindruck von Roth ausfällt. Dass aber das weisse Licht grün erscheint, hat nach der bereits oben gegebenen Erörterung seinen Grund in dem rothen Lichte, welches durch Sclerotica und Chorioidea auf die Retina fällt. Was dagegen die Ursache der rothen Farbe des anderen Bildes (in dem beschriebenen Versuche) anlangt, so weist Brücke auf den Umstand hin, dass der Ort des rothen Bildes im Sehfelde in dem bestrahlten Auge einer Stelle der Netzhaut entspricht, welche durch die Pupille kein Licht erhält, sondern nur durch den im Auge verbreiteten rothen Schimmer schwach erhellt ist, in dem nicht bestrahlten Auge hingegen einer solchen

*) Poggend. Ann. Bd. XXVII. S. 490.

Stelle, welche durch die Pupille weisses Licht erhält, das hier im Gegensatze zu dem grünen Tone, in welchem das Weiss von dem bestrahlten Auge gesehen wird, röthlich erscheint; daher wir denn das zweite Bild für roth erklären.

327. Anderweitige Versuche Brücke's*) über subjective Farben bezogen sich auf den Fall, wo ein Theil der Netzhaut durch homogenes Licht beleuchtet wird, während andere Theile derselben nicht von diesem oder anderem Lichte bestrahlt werden, sondern beschattet sind.

Brücke schloss in einem Zimmer, in welches das Himmelslicht frei einfiel, die Fensterladen, in deren einem sich ein rechteckiger Ausschnitt von 13 Zoll Höhe und 10½ Zoll Breite befand. Diesen Ausschnitt schloss er mit einem rein rothen Glase, setzte sich dann vor die roth erscheinende Oeffnung und hielt eine schwarze Scheibe aus Steingut (S. 493) so vor sich hin, dass sich ihr einfaches Bild auf den rothen Grund projicirte. Das Bild erschien grün. Also hatte das rothe Licht, welches den grössten Theil der Netzhäute bestrahlte, in den nicht bestrahlten Theilen derselben die complementäre Farbe erregt.

Brücke nennt die Farbe, welche auf den beschatteten Theilen der Netzhaut hervorgerufen wird, die inducirte Farbe und die, welche sie hervorruft, die inducirende.

Nun ist aber in der Mehrzahl der Fälle die inducirte Farbe, nach Brücke's Erfahrungen, nicht complementär zur inducirenden. Als das rothe Glas durch ein grünes ersetzt wurde, fanden Brücke und noch vier andere Mitbeobachter, dass die Scheibe gleichfalls grün war, nur an ihrem äussern Umkreise von einem schmalen rothen Rande umgeben. Setzte man an die Stelle des grünen Glases ein violettes, welches indess noch Strahlen von allen Farben, namentlich viel Roth, durchliess, so erschien das Bild schön blau oder violett. Zwei Beobachter fanden es mehr blau, die andern, wie Brücke selbst, mehr violett; doch stimmten alle Beobachter darin überein, dass die Farbe etwas mehr Blau oder etwas weniger Roth enthalte, als die des Glases. Ein blaues Glas, das noch alle Farbestrahlen durchliess und nur einen Theil des Orange absorbirte, gab kein bestimmtes Resultat, da bei Anwendung desselben das Bild einigen blau, anderen grün erschien. Ebenso ver-

---

*) a. a. O. S. 424 ff.

hielt es sich mit einem gelben Glase, welches alle Farben durchliess und nur das Indigo grösstentheils absorbirte. Die Scheibe erschien hier sehr dunkel, fast schwarz, obwohl auf derselben ein gelblicher Schimmer bemerkt wurde; die Farbe war indess nicht constant, sondern ging bald ins Grünliche über und machte mitunter einem wenig intensiven Dunkelgraublau Platz.

Um bei diesem Versuche nicht durch Nachbilder beirrt zu werden*), ist es nöthig, dass man die Scheibe ruhig halte und fest mit den Augen fixire, damit ihr Bild immer auf dieselbe Stelle der Netzhaut falle.

Brücke**) glaubt nun aus den Eigenthümlichkeiten, welche die inducirten Farben darbieten, und zu denen unter andern auch die gehört, dass sie, als solche, im Stande sind, complementär gefärbte Nachbilder hervorzurufen, schliessen zu müssen, dass diese Farben, wenigstens da wo sie mit den inducirenden übereinstimmen, wirklich auf positiven Erregungszuständen der Netzhaut beruhen. Wenn nun aber derjenige Theil der Netzhaut, welcher der inducirten Farbe entspricht, von keinem äusseren Lichte afficirt wird, auch nicht in Folge einer Lichtzerstreuung von Seiten der Nethhauttheile, welche die inducirenden Farbenstrahlen aufnehmen, so müssen wohl, wie mir scheint, jene positiven Erregungszustände der Retina, auf denen die inducirte Farbe beruhen soll, auf Grund der inducirenden Farbe vom Centralorgan aus veranlasst werden.

328. Wenn zwei verschiedenfarbige Objecte sich zugleich dem Gesichtssinne darbieten, dergestalt, dass ihre Bilder auf verschiedene Orte der Retina fallen, so kann sich nicht allein jede Farbe in ihrer Art behaupten, sondern sich auch in ihrer Eigenthümlichkeit gegen die andere noch bestimmter hervorheben, was namentlich bei Complementärfarben der Fall ist, von denen man darum auch sagt, dass sie, nebeneinander oder kurz nacheinander aufgefasst, sich verstärken; weshalb man sie wohl auch Contrastfarben nennt.

Und in ähnlicher Weise wie Complementärfarben steigern sich auch die Empfindungen des Hellen und Dunklen, wenn sie nebeneinander auftreten. So erscheint bekanntlich ein Schatten

*) s. Brücke a. a. O. S. 426 f.
**) a. a. O. S. 432 u. 446.

um so tiefer, je heller seine Umgebung beleuchtet ist, und ein grauer Fleck auf weissen Grunde dunkler, als wenn dasselbe Grau über das ganze Gesichtsfeld verbreitet wäre.

Dagegen können aber auch zwei verschiedene Farben, die sich im Gesichtsfelde nebeneinander darstellen, dergestalt einen Einfluss auf einander ausüben, dass sie einen merklich andern Eindruck machen, als wenn sie einzeln gegeben sind. Ueber diesen gegenseitigen Einfluss benachbarter Farben hat namentlich Chevreul*) viele Beobachtungen angestellt, wobei er unter anderem in folgender Weise verfuhr.

Auf dieselbe Karte klebt man vier parallele Streifen von gefärbtem Zeuge oder Papier, von denen jeder $0^m,012$ breit und $0^m,06$ lang ist. Die beiden Streifen zur Linken haben dieselbe Farbe von gleicher Intensität und sind z. B. roth, und die zur Rechten haben gleichfalls dieselbe Farbe, aber eine andere als die beiden ersten Streifen, sie sei gelb. Die beiden mittleren Streifen liegen unmittelbar aneinander, während die beiden äusseren etwa 1 Millimeter von denselben entfernt sind. Wird nun diese Karte mehrere Secunden hindurch in etwas schiefer Richtung beobachtet, so scheinen bie beiden Streifen zur Linken, obschon sie in Wirklichkeit dieselbe rothe Farbe haben, voneinander verschieden zu sein. Der zur mittleren Gruppe gehörige Streifen scheint mehr ins Violette zu fallen, so dass man seine scheinbare Farbe als aus dem wirklichen Roth und aus der Complementärfarbe des benachbarten gelben Streifens zusammengesetzt betrachten kann. Eben so scheint von den beiden andern Streifen der nach der Mitte zu ins Grüne zu fallen, und daher seine Farbe aus dem wirklichen Gelb und dem subjectiven Grün des benachbarten rothen Streifens zu bestehen. — Andere Farben, als Roth und Gelb, führen zu ähnlichen Resultaten, die Chevreul in dem Satze aussprach: dass sich zu jeder der beiden Farben die Complementärfarbe der andern gesellt. So nimmt Roth neben Blau einen Schein von Orange und das Blau einen Schein von Grün an. Grün neben Gelb erscheint mehr blau, Orange neben Violett grünlichgelb, u. s. w.

329. Die gegenseitigen Einflüsse, welche benachbarte Far-

*) Sur l'influence que deux couleurs peuvent avoir l'une sur l'autre quand on les voit simultanément. — Compt. rend. T. XXXII. p. 695.

ben aufeinander ausüben, fasst man gewöhnlich unter dem Namen des Contrastes der Farben zusammen.

Was nun die so eben besprochenen Modificationen benachbarter Farben anlangt, so liegt es nahe, dieselben auf den thatsächlichen Umstand zurückzuführen, dass sich beim Beschauen eines farbigen Objects dessen Complementärfarbe subjectiv geltend zu machen sucht, die sich dann beim Hinwenden des Blicks nach der benachbarten Farbe mit dieser zusammensetzt. So ist es ja ein bekanntes Factum, das bereits Plateau*) hervorhob, dass das complementäre Nachbild eines farbigen Objects in seiner Färbung modificirt wird je nach der Farbe des Grundes, auf welchen man die Augen richtet. Und umgekehrt erscheint hierbei auch die Farbe des Grundes an dem Orte modificirt, auf welchen man das Nachbild projicirt. Schaut man z. B. auf ein rothes Object und richtet dann die Augen auf einen gelben Grund, so erscheint das Nachbild auf diesem Grunde gelblichgrün; und in gleicher Weise wird das complementäre Nachbild eines grünen Objects violett wahrgenommen, falls man die Augen auf einen blauen Grund richtet. Freilich erfordert diese Erklärung des gegenseitigen Einflusses benachbarter Farben eine Bewegung des Auges, d. h. ein Hin- und Hergleiten des Blickes zwischen den betreffenden Farben, was wohl auch in der Wirklichkeit meist der Fall ist.

Indessen gibt es noch einige hierhergehörige Erscheinungen, die nicht verkennen lassen, dass die Gegenwart einer Farbe (in anderer Weise als so eben angenommen) den Eindruck einer zweiten objectiv gegebenen Lichteinwirkung zu modificiren vermag. Diese Modification scheint nämlich ihren Grund in einer besonderen Stimmung (resp. Verstimmung) zu haben, welche durch jene Farbe im Centralorgane bewirkt wird.

Die erste Thatsache, welche uns hier entgegentritt, ist die, dass wir unter gewissen Umständen weisses Licht nicht als weiss, sondern als gefärbt wahrnehmen, wenn gleichzeitig die Retina (an andern Orten) von bestimmten Farbenstrahlen afficirt wird. Es lässt sich diese Erscheinung erkennen, wenn man zwischen ein helles Fenster oder eine weisse Fläche und das Auge ein gefärbtes, durchscheinendes Papier bringt, auf welches ein schmaler, etwa 1 Millimeter breiter Streifen von weissem Papier befestigt ist.

*) Annal. de chim. et phys. T. LVIII. p. 352.

Der letztere erscheint dann in der dem gefärbten Papier entprechenden Complementärfarbe, also grün, wenn das Papier roth ist, violett wenn es gelb, und blau, wenn es orange ist, u. s. f. Statt des durchscheinenden gefärbten Papiers kann man zu diesen Versuchen auch farbige Gläser nehmen, auf welche man den weissen Streifen klebt.

330. An diese Erscheinung reiht sich sofort eine andere, die darin besteht, dass, wenn man zwei Farben von derselben Art, aber von verschiedener Intensität nebeneinander betrachtet, die mindere intensive, d. h. die hellere, — mit mehr Weiss gemischte, — in der entsprechenden Complementärfarbe erscheint, also grün, wenn die beiden gegebenen Farben in der bezeichneten Weise roth sind, nämlich die eine hellroth und die andere dunkelroth. Im Allgemeinen kann man in dieser Beziehung mit Brücke folgenden Satz aussprechen: Wenn das Sehfeld in grösserer Ausdehnung mit einem sehr intensiv gefärbten Lichte erhellt ist, so kann uns dieselbe Farbe, wenn sie uns in geringerer Intensität, d. h. mehr mit neutralem Grau (oder Weiss) gemischt, dargeboten wird, als complementär erscheinen.

Um diesen Satz begreiflich zu machen erinnert Brücke*) an einige andere bekannte Thatsachen, so unter anderen daran, dass wenn wir aus dem Hellen ins Dunkle, aus dem Warmen ins Kalte versetzt werden, uns das Dunkel doppelt dunkel, das Kalte doppelt kalt erscheine; was man zurückführen könne auf eine Modification der Erregbarkeit für äussere Eindrücke, welche die peripherischen Theile unseres Nervensystems erlitten haben, wobei aber anderweit zu bedenken sei, dass die Erregbarkeit des Centralorgans des Nervensystems durch ihm zugeleitete Eindrücke gleichfalls modificirt werden könne.

Insbesondere wird in Bezug auf unseren obigen Fall von Brücke hervorgehoben, dass unser ganzes Urtheil über Farben von der Vorstellung abhängen müsse, die wir von dem neutralen Grau oder, wenn es sich um höhere Lichtintensitäten handle, vom reinen Weiss haben. „Wenn das Gedächtniss in unseren Sinnen ein absolutes und mithin die Vorstellung von Weiss in uns eine unwandelbare wäre, so würden wir auch immer richtig

*) Poggend. Ann. Bd. LXXXIV. S. 429 ff.

über die Farben urtheilen, d. h. wir würden nur Grün für grün, Roth für roth, etc. erklären. Dem ist aber nicht so; vermöge der Unvollkommenheit unseres sinnlichen Gedächtnisses nennen wir zu verschiedenen Zeiten Dinge weiss, welche sich nebeneinander als höchst verschiedenfarbig erweisen. Wären wir nun disponirt, ein Licht weiss zu nennen, welches z. B. einen Ueberschuss an Grün enthält, so würden wir zu derselben Zeit das reine Weiss für roth erklären; und wiederum ein andermal könnten wir dieses selbe reine Weiss für Grün erklären, wenn wir disponirt wären, ein Licht mit einem Ueberschuss an rothen Strahlen für weiss zu halten."

Sodann erinnert Brücke an das bekannte Factum, dass wenn wir plötzlich eine grosse Menge farbigen Lichtes auf unsere Augen wirken lassen, wie dies z. B. der Fall ist, wenn wir durch ein farbiges Glas sehen, die Farbe desselben im ersten Augenblicke mit der vollen Energie auf uns wirkt, diese aber von Moment zu Moment abnimmt, und zwar in solchem Masse, dass Leute, welche eine farbige Brille tragen, oft nachdem sie dieselbe kurze Zeit vor den Augen gehabt haben, sich nicht mehr deutlich bewusst sind, dass sie die Gegenstände in anderen als in den natürlichen Farben sehen. Wenn nun in dem Masse, in welchem für uns die Energie des Farbeneindruckes verloren geht, auch, wie es höchst wahrscheinlich ist, unsere Vorstellung vom Weiss verändert wird, so werden wir unmittelbar disponirt, das reine Weiss oder neutrale Grau für complementär gefärbt zu halten, so dass, wenn die Verschiebung unserer Vorstellung vom Weiss bedeutend ist, uns sogar ein gefärbter Gegenstand in der zu seiner wahren Farbe complementären erscheinen kann. Denkt man sich z. B., fügt Brücke noch hinzu, man sehe durch ein grünes Glas und die Energie des Eindruckes dieser Farbe sei schon so weit gesunken, dass man gemischtes Licht mit einem beträchtlichen Ueberschuss von Grün schon für weiss erklären würde, so müsste man offenbar ein anderes gemischtes Licht, in dem ein geringerer Ueberschuss von Grün vorhanden wäre, schon für roth erklären, wenngleich man es im Normalzustande der Empfindungen ohne Zweifel Grün nennen würde.

Bemerkt sei noch, dass sich Contrasterscheinungen auch dann noch einstellen, wenn von den beiden gegebenen Lichteindrücken der eine nur das eine Auge und der andere nur



das andere afficirt*). Im Uebrigen verweisen wir hier auf die bereits im §. 298 beschriebenen subjectiven Farbenerscheinungen, die zur Ergänzung dessen dienen können, was wir von S. 476 ab bis hierher über die subjectiven Farben mitgetheilt haben.

331. Zum Schlusse unserer Betrachtungen über die Farbenempfindungen insbesondere heben wir hier noch das Unvermögen mancher Personen hervor, gewisse Farben, als solche, zu erkennen und voneinander zu unterscheiden, obschon dieselben Personen wohl sonst ganz gut sehen. Ein Schuhmacher in Cumberland konnte, nach Brewster, wie es schien, fast gar keine Farbe von der andern unterscheiden; es gab für ihn nur Schwarz und Weiss. Ein gewisser Scott erzählte von sich selbst, dass es keine grüne Farbe für ihn gebe; Nelkenbraun und Blassblau kamen ihm gleich vor; oft war er nicht im Stande, gesättigtes Purpurroth von tiefem Dunkelblau zu unterscheiden. Dagegen unterschied er Hell-, Dunkel- und Mittelgelb, und alle Nuancen von Blau mit Ausnahme des Himmelblau. Ein gewisser Collardo konnte blaue und gelbe, sowie auch rothe und grüne Strahlen nicht unterscheiden. Und Harvey erzählt von einem Schneider, welcher einen carmoisinrothen Lappen auf den Ellenbogen eines blauen Kleides setzte. Ein Anderer sah im Spectrum des Sonnenlichtes blos Blau und Gelb. Der berühmte Chemiker Dalton konnte Blau von Blassroth nicht unterscheiden, im Regenbogen bemerkte er das Roth gar nicht, und das Ganze schien ihm nur aus zwei Farben: Gelb und Blau zu bestehen**). Daher nennt man wohl auch eine Art des mangelnden Farbensinnes Daltonismus. — Auffällige Beispiele ähnlicher Art gibt es sehr viele***). Nach einer Zusammenstellung von Wardrop†) über diesen Gesichtsfehler findet in Rücksicht auf Blau

---

*) s. H. Meyer in Berichten der kais. Acad. d. Wissens. in Wien, Bd. VII. S. 454, u. Archiv für Ophthalmologie, Bd. II. 2. S. 77.

**) Edinb. Journ. of Science New. Ser. N. IX. p. 88.

***) Philos. Transact. T. LXVII. 1. p. 14; T. LXVIII. 2. p. 611. — Journ. de Phys. T. XII. p. 86. — Edinb. Philos. Transact. T. X. p. 253: — Edinb. Journ. of Science. T. VII. p. 85; Ibid. T. XI. p. 135, (s. Archiv für Physiol. v. Meckel, etc. Bd. V. S. 260). — Medico-chir. Transact. T. VII. p. 477, T. IX. p. 359. — Göthe zur Morphologie u. Naturw. 1. Hft. 4. S. 297. — G. Wilson, Researches on colour-blindness, etc. 1856, Dingler's polytechn. Journ. CXLVI. S. 25. — W. Pole in Philos. Magaz. Ser. 4. XIII. p. 282.

†) Essays on the morbid anatomy of the human eye. Lond. 1818. T. II. p. 196. Deutsch. Archiv Bd. V. S. 262.

und Gelb fast nie ein Irrthum statt, während alle anderen Farben gewissermassen als Abänderungen dieser beiden erscheinen.

Herschel *) stellte Versuche mit dem Auge eines Optikers an, das mit diesem Fehler behaftet war, und benutzte dabei die durch polarisirtes Licht vermittelst eines Glimmerblättchens erzeugten Farbenbilder. Das Auge unterschied nur blaue und gelbe Färbung. Herschel schliesst, dass der Fehler nicht von einer eigentlichen Unempfindlichkeit der Retina gegen Lichtstrahlen von gewisser Brechbarkeit herrühren könne, weil die Gegenstände, welche diese Strahlen reflectiren, wirklich gesehen würden, und eben so wenig von einem färbenden Stoffe in einer der Flüssigkeiten des Auges, der gewisse Farbestrahlen nicht zur Retina gelangen lasse, sondern vielmehr von einem Mangel im Sensorium (Gehirn), durch welchen verhindert werde, diejenigen Unterschiede der Lichtstrahlen aufzufassen, von welchen die Verschiedenheit der Farben abhänge. Es habe den Anschein, als ob von den betreffenden Personen der Eindruck aller stärker brechbaren Strahlen durch Blau, aller weniger brechbaren durch Gelb bezeichnet werde.

Indessen ist doch noch fraglich, ob dieser Fehler, der im Allgemeinen in der Unfähigkeit des Sehorgans besteht, Aetherwellen von verschiedener Länge in qualitativ verschiedene Lichtempfindungen umzusetzen, nicht auch seinen Sitz in der Retina haben kann, zumal da, wie besonders die Versuche Aubert's (S. 416 ff.) gelehrt haben, auch von einem normalen Auge Farben unter Umständen nicht wahrgenommen werden. Auf den Seitentheilen der Retina kann die Farbe eines Gesichtsobjects verschwinden, ohne dass dieses darum ganz unsichtbar wird, welches letztere freilich dann geschieht, wenn das Bild des Objects zu weit seitlich auf die Retina fällt, während es andrerseits unter gewissen Umständen auch möglich ist, dass die Form eines Objects früher verschwindet als seine Farbe. Nach denselben Versuchen besteht aber zwischen den seitlichen und centralen Theilen der Netzhaut, in Bezug auf die Farbenwahrnehmung, nur ein gradueller Unterschied. Man könnte nun daran denken, dass der mangelnde Farbensinn begründet sei in einer sehr raschen Abstumpfung der Retina für gewisse Farbestrahlen, wonach denn allerdings der Unterschied zwischen dem normalen Auge und einem mit dem in Rede stehenden Feh-

*) Art. „Light", Encyclop. Metrop. T. II. p. 434.

ler behafteten nur ein gradueller sein würde, zu welcher Annahme auch Aubert*) geneigt ist. Wie dem auch sein mag: nach den vorliegenden Thatsachen über diesen Gegenstand scheint es nicht erfordert zu werden, denselben gerade von einem Mangel im Sensorium abzuleiten.

332. Weitere Beobachtungen über diesen Gesichtsfehler machte A. Seebeck**) an zwölf Personen. Derselbe ist, wie Seebeck bemerkt, überhaupt häufiger, als man gewöhnlich glaubt, nicht selten erblich und mehreren Gliedern einer Familie gemeinsam. Es wird jedoch sehr oft das Vorkommen eines solchen Mangels unbeachtet bleiben, indem zuweilen die nächsten Angehörigen solcher Personen, ja sogar diese Personen selbst ihn nicht gewahr werden. Seebeck bediente sich bei seinen Beobachtungen eines Vorrathes von 300 farbigen Papieren, die den zu prüfenden Individuen nach und nach zur Anordnung übergeben wurden. Aehnliche Versuche wurden auch mit farbigen Gläsern gemacht. Als Resultat der (am citirten Orte) im Einzelnen mitgetheilten Beobachtungen gibt Seebeck Folgendes an.

Ausser solchen Personen, welche in der Bestimmung der Farben Schwierigkeiten finden, ohne jedoch ungleiche Farben für gleich zu halten, kommen nicht selten solche vor, die, bald in höherem, bald in geringerem Masse, gewisse ganz ungleiche Farben miteinander verwechseln. Aber nicht nur in Beziehung auf die Stärke, sondern auch in Beziehung auf die Art dieser Verwechselungen sind Unterschiede bemerkbar. In letzterer Hinsicht zerfallen die untersuchten Individuen, kleinere Verschiedenheiten nicht gerechnet, in zwei Klassen. Die zur ersten Klasse gehörigen verwechseln folgende Farben mehr oder weniger miteinander:

Helles Orange mit reinem Gelb. — Gesättigtes Orange, helles Gelblich-, oder Bräunlichgrün und Gelbbraun. — Reines Hellgrün, Graubraun und Fleischfarb. — Rosenroth, Grün (mehr bläulich als gelblich) und Grau. — Carmoisin, Dunkelgrün und Haarbraun. — Bläulichgrün und unreines Violett. — Lila und Blaugrau. — Himmelblau, Graublau und Graulila.

Als das Wesentliche ihres Gesichtszustandes ergab sich Folgendes: Sie haben einen sehr mangelhaften Sinn für den speci-

*) Archiv für Ophthalmologie, Bd. III. Abth. II. S 62.

**) Poggend. Ann. Bd. XLII. S. 177.

fischen Eindruck aller Farben überhaupt; am unvollkommensten ist er für das Roth und für das complementäre Grün, indem sie diese beiden Farben vom Grau wenig oder gar nicht unterscheiden; nächstdem für das Blau, das sie auch vom Grau ziemlich unvollkommen unterscheiden; am meisten ausgebildet pflegt ihr Sinn für das Eigenthümliche des Gelb zu sein; doch ist ihnen auch diese Farbe viel weniger vom Farblosen verschieden, als dies beim normalen Auge der Fall ist.

Auch die zur zweiten Klasse gehörigen Personen erkennen Gelb noch am besten; sie unterscheiden Roth etwas besser, Blau etwas weniger vom Farblosen, vorzüglich aber Roth von Blau viel unvollkommener als die erste Klasse. Die von ihnen verwechselten Farben sind nämlich folgende:

Hellorange, Grünlichgelb, Bräunlichgelb und reines Gelb. — Lebhaft Orange, Gelbbraun und Grasgrün. — Ziegelroth, Rostbraun und Dunkelolivengrün. — Zinnoberroth und Dunkelbraun. — Dunkelcarmoisinroth und Schwärzlichblaugrün. — Fleischroth, Graubraun und Bläulichgrün. — Mattes Bläulichgrau und Grau (etwas bläulich). — Unreines Rosa (etwas gelblich) und reines Grau. — Rosenroth, Lila, Himmelblau und Grau (etwas ins Lila fallend). — Carmoisin und Violett. — Dunkelviolett und Dunkelblau.

Dieselben haben, was bei der ersten Klasse nicht der Fall ist, nur eine geschwächte Empfindung von den weniger brechbaren Strahlen. Und dieser Umstand ist es allein oder vorzugsweise, auf welchem der Unterschied zwischen beiden Klassen beruht; denn derselbe erklärt nicht nur, warum Roth von der zweiten Klasse mit dunklerem Grün, als von der ersten verwechselt wird, sondern es lassen sich auch wohl die übrigen Unterschiede beider daraus ableiten, wenn man bedenkt, dass durch den Mangel der gelbrothen Strahlen erstlich das farblose Licht dem Blau (wenigstens dem Blau der ersten Ordnung) näher kommt, und zweitens auch Roth (wenigstens ein aus den beiden Enden des Spectrums gemischtes) näher dem Blau oder Violett. Seebeck fand auch, dass in der Dämmerung der Zustand der ersten Klasse in den der zweiten übergeht, weil nämlich, wie er bemerkt, in der Dämmerung die weniger brechbaren Strahlen zuerst aus dem Lichte der Atmosphäre verschwinden, wodurch die bekannten Aenderungen in dem Ansehen der Farben entstehen.

Nach Seebeck lassen sich alle ihm bekannt gewordenen Fälle

in die eine oder andere der beiden so eben betrachteten Klassen bringen; nur scheine zuweilen eine Verwechselung von Grün und Blau und also eine schwächere Wahrnehmung für Gelb im höheren Grade stattzufinden*), als ihm vorgekommen sei.

Purkinje**) unterscheidet vier Klassen dieses Gesichtsfehlers, von denen sich zwei auf die Stärke, die beiden anderen auf die Art desselben beziehen. Doch sind die letzteren nach Seebeck nicht merklich voneinander verschieden und die dahin gerechneten Fälle gehören sämmtlich zu Seebeck's zweiter Klasse.

Bemerkt sei hier noch, dass nach Dove***) Individuen, welche bestimmte Farben nicht zu unterscheiden vermögen, dennoch die für sie gleichen, aber für ein normales verschiedenen Farben aus ungleicher Entfernung deutlich sehen. Dove stellte mit ihnen Versuche in Bezug auf das deutliche Sehen eines weissen schmalen Gegenstandes durch ein rothes und blaues Glas mit demselben Erfolg an, als mit denen, welche die Farben vollkommen unterscheiden.

Man hat bemerkt, dass mangelnder Farbensinn viel häufiger bei blauen als bei braunen Augen stattfindet; auch unter den von Seebeck untersuchten Fällen sind nur zwei der letzteren Art. Doch hat dies wohl, wie Seebeck glaubt, seinen Grund vorzugsweise darin, dass blaue Augen bei uns überhaupt häufiger sind, als braune; ebenso in England, von wo wir die meisten Beobachtungen ähnlicher Art haben. — Beim weiblichen Geschlechte soll sich dieser Fehler †) viel seltner finden.

333. Schliesslich wollen wir nun noch einige Lichtphänomene verschiedener Art aufführen, die zum Theil gewissermassen den schon früher betrachteten entoptischen Gesichtserscheinungen (S. 412) beigezählt werden können.

Zunächst seien hervorgehoben die langen Strahlen, die man bei gesenkten Augenlidern an einem leuchtenden Gegenstande, z. B. an einer Kerzenflamme, nach oben und unten ausfahrend, wahr-

---

*) Gall, Anatom. et Physiol. du syst. nerveux. T. IV. p. 98. — Rozier, Observ. sur la phys. T. XIII. — Brewster's Briefe über natürliche Magie. S. 44 d. Uebersetzung. — Helling, Prakt. Handb. d. Augenkrankh. Bd. I. S. 1.

**) Im encyclop. Wörterb. der medic. Wissensch. Bd. I. S. 259.

***) Darst. der Farbenlehre u. optische Studien, Berlin 1853. S. 189 f.

†) s. darüber auch Wartmann, Mémoire sur le Daltonisme etc. Genève 1844. — Brewster, Lond. and Edinb. Phil. Magaz. N. CLXIV. p. 134.

nimmt. Man suchte dieselben früher nach Vieth*) durch eine Reflexion der Lichtstrahlen (der Flamme) an den Rändern der Augenlider zu erklären. Später leiteten Mousson und Schwerd dieselben vollständiger aus einer Brechung der Lichtstrahlen in der sich zwischen dem Augenlide und der Cornea ansammelnden Feuchtigkeit ab**). Und diese Ansicht wurde fast allgemein angenommen. Neuerdings hat sich auch H. Meyer***) genauer mit dieser Erscheinung beschäftigt und sie gleichfalls aus einer Brechung der Lichtstrahlen erklärt. Der von der Lichtflamme nach oben gerichtete Strahl entsteht, sobald das untere Augenlid so weit heraufkommt, dass es vor die Pupille tritt, der nach unten gerichtete, sobald man das obere so weit senkt, dass es vor die Pupille kommt. Schliesst man die Pupille so weit, dass beide Ränder vor die Pupille kommen, so sieht man gleichzeitig die nach oben und unten gerichteten Strahlen. Die Thränenfeuchtigkeit bildet nun da, wo sich das Augenlid an den Augapfel anlegt, einen erhöhten Saum, der aber, nach Meyer, vermöge der Fettigkeit des Augenlidrandes, keineswegs ununterbrochen ist, sondern vielmehr aus lauter kleinen Viertelcylindern besteht. Die durch diese Cylinder abgelenkten Lichtstrahlen convergiren in Ebenen winkelrecht auf die Axen der Cylinder und müssen so im Auge divergirende Strahlen erzeugen, ähnlich wie Lichtlinien, die sich innerhalb der Brennweite befinden. In der Richtung der Axe eines jeden Cylinders findet aber ein derartiges Convergiren der Strahlen nicht statt; daher bilden sich im Auge gerade Strahlen, wie man sie auch wahrnimmt, und deren Breite von der Breite der Lichtquelle abhängt.

Ausser diesen langen Strahlen bemerkt man, namentlich in grösserer Entfernung von der Lichtquelle, noch weit kürzere, mehr parallele, fast immer stark durch Interferenzen unterbrochene und zum Theil gefärbte Strahlen auf der den langen Strahlen entgegengesetzten Seite. Sind die letzteren nach unten gerichtet, so erscheinen diese kleinen intensiven Strahlen, auf welche Meyer aufmerksam gemacht, oben, und umgekehrt. Meyer schliesst hieraus, was auch Versuche durch Verdecken und Wegziehen des Augenlides bestätigten, dass die nach oben gerichteten kleineren Strah-

*) Gilbert's Ann. Bd. XIX. S. 187 ff.

**) Poggend. Ann. Bd. XXXIX. S. 244.

***) Poggend. Ann. Bd. LXXXIX. S. 429.

len vom oberen, die nach unten gerichteten vom unteren Augenlide und zwar durch Reflexion verursacht werden. Ein Theil der auf jene Cylinder auffallenden Strahlen wird nämlich nicht durch dieselben gebrochen, sondern reflectirt und erzeugt im Auge diese kleinen Strahlen. Die letzteren sind, wie schon bemerkt, von dunklen Interferenzstreifen unterbrochen. Die Breite der hellen Streifen (Fransen) ist nicht gleich; der äusserste helle Streif ist der breiteste, und sie werden um so schmäler, nämlich der Abstand zweier aufeinander folgender dunkler Streifen um so kleiner, je näher sie dem Bilde der Lichtquelle liegen. Bei weissem Lichte zeigen sie auch farbige Ränder; die dem Bilde der Lichtquelle zugewendeten farbigen Säume sind roth, die von der Lichtquelle abgewendeten blau. Nach Meyer*) werden nun diese Interferenzstreifen durch das von den kleinen Wassercylindern reflectirte, im Auge divergirende Licht beim Vorbeigange an der Iris erzeugt, so dass dieselben also eine Beugungserscheinung im Auge sind. Die Beugung erfolgt in einem kleinen, ziemlich als gerade anzunehmenden Theile der Pupille, und daher kommt es auch, dass die Interferenzlinien, ungeachtet die Breite der kurzen Strahlen nicht unbedeutend ist, doch nur eine unbedeutende Krümmung zeigen.

334. Meyer**) machte auch über den die Flamme eines Lichtes umgebenden Hof eine Reihe von Beobachtungen. Wenn man nämlich eine Lichtquelle, z. B. die Flamme eines gewöhnlichen Kerzenlichtes, mit einiger Aufmerksamkeit betrachtet, so nimmt man um die Flamme deutlich einen Lichthof wahr. Schon bei flüchtiger Beobachtung tritt ein die Lichtquelle zunächst umgebender und mit derselben gleichfarbiger Ring hervor, der aussen von einem rothen Ringe eingeschlossen wird. Bei genauerer Betrachtung lässt sich aber auch noch ein blaugrüner und äusserer rother Ring unterscheiden. Die Ursache dieses Lichthofes liegt ohne Zweifel im Auge, und wird durch Licht erzeugt, das von der betreffenden Lichtquelle ausgeht und im Auge abgelenkt wird. Nur über die Art und Weise, wie dieser Hof im Auge gebildet wird, wurden verschiedene Ansichten aufgestellt. Nach Newton und Cartesius findet blos eine Ablenkung und Zerlegung der Lichtstrahlen

---

*) Poggend. Ann. Bd. XCVI. S. 603.

**) Poggend. Ann. Bd. XCVI. S. 235.

durch Brechung statt; Brougham und Brandes sehen darin eine Beugungserscheinung und Brewster postulirt eine im Auge stattfindende Reflexion an der concaven Oberfläche der Krystalllinse, oder an der Cornea. Nach Meyer ist die Ursache sowohl des (gelben) Hofes als auch der farbigen Ringe allerdings die Beugung des Lichtes beim Durchgange durch ein enges Netz. Brougham nimmt aber als Ursache der Beugung die feinen und undurchsichtigen Fasern an, welche die Haut auf der Cornea bilden, und Brandes die feinen undurchsichtigen Verdichtungen, die auf der Haut des Auges befindlich seien; nach Meyer ist es jedoch, wie Versuche mit einer befeuchteten Glasplatte zeigten, keineswegs nöthig, dass die beugenden Oeffnungen durch undurchsichtige Zwischenräume getrennt seien, sondern es genügt schon, wenn die Zwischenräume das Licht anders brechen. Hiernach könnte nun die Beugung auch geschehen durch die das Auge bedeckende Schicht von Fett und Wasser, durch die Structur des die Cornea bedeckenden Theiles der Bindehaut, durch die vordere Linsenkapsel, durch die unter der letzteren befindliche Zellenlage (Morgagni'sche Feuchtigkeit), durch die Structur der Linse etc., oder durch mehrere dieser Ursachen zugleich.

Man beobachtet diesen Lichthof auch bei reinem, vom Sonnenlichte nicht mehr erhellten Himmel am Monde; daher der bei reinem Himmel um den Mond sichtbare Hof in vielen Fällen keine in der Luft erzeugte Beugungserscheinung, sondern im Auge des Beobachters begründet sein wird.

335. Die Thatsache, dass, wenn ein Theil der Netzhaut durch starkes Licht gereizt wird, der anliegende Theil seine Empfindlichkeit für äussere Eindrücke verliert, glaubte Meyer auf den hierbei eintretenden Lichthof zurückführen zu müssen. Sonach wäre dann dieser Lichthof die Ursache, weshalb ein Gegenstand in der Nähe eines helleren dunkler erscheint, als er es ist; weshalb man auf einem, gegen das Tageslicht gehaltenen, beschriebenen Blatte Papier die Schrift nicht lesen kann, während doch die auf dem Blatte selbst vorhandene Helligkeit hierzu ausreicht. Gewiss wird auf diese Erscheinung der besprochene Lichthof nicht ohne Einfluss sein; allein es gibt hier noch mehre Umstände, die zu derselben Erscheinung ihren Beitrag liefern. Dazu gehört die schon früher von uns erwähnte zerstreuende Reflexion, welche vom Retinabilde eines hellen Objects aus auf die übrigen Netzhautpartien und auch ge-

gen die optischen Medien des Auges bis zur Hornhaut hin erfolgt, von welcher letzteren die Lichtstrahlen theilweise von Neuem nach der Retina zurückgeworfen werden. Hierdurch geschieht es nun, dass das Licht eines hellen Objects nicht nur den Ort der Retina, auf welchen sein Bild fällt, sondern auch noch die übrigen Retinatheile bis zu einem gewissen Masse erleuchtet, und zwar in der Art, dass die Erleuchtung am stärksten ist in der Nähe des Bildes und sich von hier aus in abnehmendem Grade über die ganze Retinafläche erstreckt. Und eine Folge davon ist, dass das Retinabild eines mässig hellen Objects, wenn dasselbe in die Nähe des Bildes eines viel helleren fällt, dergestalt verwischt wird, dass jenes Object nicht zur Wahrnehmung gelangt. Und in sofern kann man sagen, dass das Licht eines sehr hellen Objects alle übrigen Netzhauttheile in der Umgebung seines Bildes mehr oder weniger unempfindlich für alle anderen Lichteindrücke macht. So verschwindet ein schwach leuchtender Stern, den man des Abends betrachtet, wenn man dem Auge das Licht einer Lampe von der Seite her nähert *). Diese Unempfindlichkeit erreicht ihr Maximum dicht bei dem Bilde und nimmt von hieraus mit wachsender Entfernung ab. Auf solche Weise verschwinden nicht allein mässig beleuchtete Objecte, wenn ihre Retinabilder in die Gegend einer stark erleuchteten Netzhautpartie fallen, sondern Körper von lebhaften Farben werden hierbei auch alles Glanzes beraubt und selbst in ihrer Farbe verändert **).

336. Der oben betrachtete Lichthof soll nach Meyer auch bei vielen Erscheinungen der farbigen Nachbilder, Complementär- und Contrastfarben von Einfluss sein, namentlich was die Erscheinungen auf den vom farbigen Lichte nicht direct getroffenen Stellen betrifft. Indessen ist hierbei ohne Zweifel von besonderer Bedeutung auch der von Brücke hervorgehobene Umstand, dass nämlich das durch die Sclerotica und Chorioidea dringende (weisse) Licht einen röthlichen Farbenton gewinnt (s. §. 326).

Ausserdem vermuthet Meyer noch, dass eben derselbe Lichthof auch mit der Erscheinung der sog. Löwe'schen Farbenringe im Zusammenhange stehe. Diese Ringe***) zeigen sich beim

*) s. Fechner, Psychophysik, Th. I. S. 169 f.

**) s. Brewster in Poggend. Ann. Bd. XXVII. S. 494.

***) Poggend. Ann. Bd. LXX. S. 403; Bd. LXXXVIII. S. 451.

Durchsehen durch gefärbte Flüssigkeiten, am auffallendsten bei sog. dichromatischen Mitteln, z. B. bei einer klaren Auflösung von Chromchlorid in Wasser. Sieht man durch dieses seladongrüne Medium gegen einen hellen Grund, gleichviel ob dasselbe dicht vor das Auge gehalten oder in die Entfernung des deutlichen Sehens gebracht wird; so bemerkt man in der Sehrichtng auf dem grünen Grund violette Ringe. Aehnliches beobachtet man bei einer Auflösung von Chromalaun. Dagegen geben Kupferchlorid, essigsaures Kupferoxyd etc. keine Ringe, sondern nur einen etwas lebhafter gefärbten, helleren Fleck. Diese zuletzt angeführten Substanzen gehören zu den sog. einfarbigen Mitteln, ebenso auch die Lösung von Kupferoxyd in Ammoniak; bei dieser erscheinen jedoch die Ringe ebenfalls, aber gleichfarbig mit dem Grunde und nur durch grössere Dunkelheit davon abstechend.

337. Haidinger machte die Entdeckung, dass sich das polarisirte Licht auch unmittelbar durch das Auge erkennen oder vom unpolarisirten Lichte unterscheiden lässt, insofern nämlich als jenes der Wahrnehmung zwei blassgelbe Büschel darbietet, deren Verbindungslinie senkrecht zur Richtung der Schwingungen ist. Lässt man das von einer weissen, mässig erleuchteten Wolke reflectirte Licht, welches nicht polarisirt ist, in das Auge fallen, und bringt man dann schnell vor das letztere ein Nicol'sches Prisma, so erscheinen, beim Drehen desselben, mit dem polarisirten Lichte jene gelben Büschel, die zwar immer dieselbe Gestalt behaupten, aber ihre Lage mit der Lage der Polarisationsebene verändern. Ausser diesen Büscheln kann man bei schärferer Beobachtung noch zwei andere mit complementärer (blauvioletter) Farbe wahrnehmen, die in der Polarisationsebene gelegen sind, und deren Stellung senkrecht zu jenen ist. Auch kann man die Erscheinung wahrnehmen, wenn man unter einem gewissen Winkel auf einen Glasspiegel sieht, worin sich der helle Himmel spiegelt, und endlich auch, wenn polarisirtes Licht direct in das Auge gelangt, wie dies der Fall ist, wenn man mit freiem Auge den blauen Himmel, der immer wenigstens theilweise polarisirtes Licht und von manchen Stellen aus sogar fast vollständig polarisirtes Licht entsendet, an bestimmten Stellen betrachtet. Indess ist die Erscheinung dieser Polarisationsbüschel, unter denselben äusseren Umständen, keineswegs eine andauernde; sie verschwindet vielmehr sehr bald, wenn nicht die anfängliche Lage der Polarisationsebene des einfallenden

Lichtes sich fortwährend verändert*). Daher ist zur bequemern und genauern Wahrnehmung dieser Erscheinung immerhin die Benutzung eines Nicol'schen Prisma in der oben bezeichneten Weise sehr geeignet, indem man dasselbe vor dem Auge dreht und dadurch eine öftere Veränderung in der Lage der Polarisationsebene bewirkt.

Es lag nahe, bei Erklärung der in Rede stehenden Erscheinung an den schichtenförmigen Bau der Krystalllinse zu denken, vermöge dessen sie wohl als eine polarisirende (resp. analysirende) Vorrichtung wirksam sein könnte. Allein die bis jetzt aufgestellten Erklärungsversuche haben noch keine genügenden Aufschlüsse zu geben vermocht. Wie Haidinger**) vermuthete, könnten die Polarisationsbüschel vielleicht auf dem Princip der farbigen Dispersion, veranlasst durch die unvollkommene Achromasie des Auges, beruhen. Auch schliessen sich an diese Büschel unmittelbar die Löwe'schen Ringe an, die mit denselben im polarisirten Lichte erscheinen und sie einschliessen. Die Ringe wären, wie Haidinger bemerkt, durch einen zarten Schatteneindruck hervorgebracht, und zwar der mittlere hellere Theil als Bild der Pupille selbst umgeben von Zerstreuungssäumen.

*) Poggend. Ann. Bd. XCIII. S. 318.

**) Poggend. Ann. Bd. XCVI. S. 314; 321 ff.

Dritte Abtheilung.

Psychologische Optik

und

Theorie des räumlichen Vorstellens.



Erstes Kapitel.

Die Theorie des Sehens vom Standpunkte der empirischen Psychologie.

338. Zwischen den äusseren Objecten und dem, was wir Seele nennen, besteht keine unmittelbare Wechselwirkung. Die Seele sieht diese Objecte nicht ohne Weiteres, sondern nur durch die Vermittelung des Auges. Dieselben bieten sich also nicht unmittelbar, wie sie sind, der Wahrnehmung durch die Seele dar; alles, was sie dem Gesichtssinne gewähren, sind ihre Bilder auf der Retina des Auges. Allein auch diese Bilder sehen wir nicht unmittelbar; wir glauben vielmehr die äusseren Gegenstände selbst zu sehen, die wir uns ganz anders, als es der Fall ist, vorstellen würden, wenn ihre Netzhautbilder wirklich unmittelbar, so wie sie sich auf der Retina darstellen, wahrnehmbar wären. So können wir also nur mit Sicherheit behaupten, dass das Sehen der äusseren Objecte durch deren Netzhautbilder vermittelt wird.

339. Die Aetherwellen, welche sich zu einem Bilde auf der Netzhaut vereinigen, versetzen die Elemente der letzteren, so weit sie vom Bilde bedeckt ist, in gewisse Reizzustände, die von den entsprechenden Fasern des Sehnerven zum Centralorgan geleitet hier bestimmte Lichtempfindungen auslösen. Denjenigen Theil des Centralorgans (Gehirns), wo dies geschieht, nennen wir die Seele, ohne über deren Natur hier etwas Näheres aussagen zu wollen. Wir können es aber füglich als eine Thatsache hinnehmen, dass jedes Netzhautbild, welches einem äusseren Gegenstande entspricht, einen bestimmten Complex von Lichtempfindungen liefert, der von der Seele in der Form eines continuirlichen Nebeneinander, d. h. als Fläche, vorgestellt wird. Mehr dürfen wir von dem flächenhaften Retinabilde (eines Objectes) nicht erwarten, das gewiss nicht

sofort zur Auffassung der Tiefendimension führen kann. Auch finde auf keinen Fall ein Nachaussensetzen der Lichtempfindungen statt, die lediglich innere Zustände des Substrats sind, worin sie sich erzeugen, und dem sie ein für allemal inhäriren; wohl aber erhalten sie allmälig eine Beziehung auf äussere Objecte, die sich die Seele allerdings in bestimmten Entfernungen vorstellt. Und wahrscheinlich erlangen auch die von den Aetherwellen äusserer Objecte herrührenden Lichtempfindungen, weil sie mit dem Oeffnen und Schliessen des Auges kommen und schwinden, schon frühzeitig eine Beziehung auf das Auge, wie denn auch wohl ihr Complex als etwas vor dem Auge Befindliches vorgestellt wird, sobald wir mittelst des Tastsinnes von unserem Auge, überhaupt von unserem Leibe und anderen äusseren Objecten distincte Wahrnehmungsbilder gewonnen haben.

340. Wenngleich nun wahrscheinlich ist, dass die Seele schon anfänglich auch bei ruhendem Auge zu einem flächenartigen Sehen gelangt, so ist doch nicht zu verkennen, dass die Umrisse einer Fläche vorzugsweise durch die Bewegungen des Auges gewonnen werden, deren man sich bei Auffassung einer räumlichen Gestalt sehr wohl bewusst wird. Auch hat man in neuerer Zeit, wie es scheint, mehr und mehr erkannt, dass die grosse und freie Beweglichkeit des Auges von besonderer Bedeutung für die Auffassung räumlicher Gestalten sei. Indem der Blick mit ungemeiner Schnelligkeit über die Fläche eines Körpers hin- und hergleitet, und die verschiedenen Theile derselben im raschen Nacheinander auf die empfindlichste Stelle der Retina bringt, entsteht in einer verhältnissmässig sehr kurzen Zeit eine grosse Menge momentaner Eindrücke, die sich zu dem Gesammteindruck der Fläche zusammenschliessen, so dass sie in demselben in der Form eines continuirlichen Nebeneinander, d. h. in räumlicher Form vorgestellt werden. Auch kann es nicht ausbleiben, dass sich mit den reinen Lichtempfindungen die Muskelempfindungen des bewegten Auges verbinden. Wenn nämlich das Auge beim Auffassen einer räumlichen Gestalt sich bald nach rechts, bald nach links, bald nach unten und bald nach oben wendet, so entsprechen diesen Bewegungen verschiedene Empfindungen, die sich mit den gleichzeitig aufgenommenen Lichtempfindungen im Centralorgane associiren. Und zu diesen Bewegungen des Auges gesellen sich noch, wenn die Ausdehnung der Gestalt bedeutend ist, Drehungen des Kopfes

in demselben Sinne, denen gleichfalls bestimmte Muskelempfindungen entsprechen. Auf solche Weise kommt in die Gesichtsvorstellung eines Objects eine Beziehung auf ein Rechts und Links, sowie auf ein Unten und Oben.

Dass die Bewegungen des Kopfes und Auges (resp. deren Lage) in der That Einfluss auf unser Urtheil über die Lage der Gesichtsobjecte hat, folgt unter anderem mit Evidenz aus einer von Ruete *) hervorgehobenen Erscheinung, die darin besteht, dass das längliche Nachbild einer Kerzenflamme sich, seiner Lage nach, in entsprechender Weise mit der Lage des Kopfes (oder Auges) ändert, so dass es bei aufrechter Stellung des Kopfes vertikal und bei hinreichender Neigung des Kopfes (nach der Seite) wagerecht gelagert erscheint, obgleich in beiden Fällen dieselben Netzhautelemente von dem Nachbilde bedeckt sind. Gewiss liegt der Grund dieser Erscheinung darin, dass sich die Lichtempfindungen, als solche, mit den in Folge der Bewegungen des Kopfes und Rumpfes auftretenden Muskelempfindungen associirt haben, dergestalt, dass jeder gegebene Complex von Lichtempfindungen die räumlichen Beziehungen seiner Lage durch die begleitenden Muskelempfindungen gewinnt.

Die Wahrnehmungen durch den Tastsinn entsprechen aber in diesem Betracht ganz den Auffassungen des Gesichtssinnes. Gleiten nämlich die Finger der Hand auf einer Fläche hin und her, bald nach rechts und links, bald nach unten und oben; so verbinden sich die reinen Tastempfindungen mit den Muskelempfindungen der Finger oder des bewegten Armes, wie dort die reinen Lichtempfindungen mit den Muskelempfindungen des bewegten Auges und Kopfes. Beide Sinne müssen wohl in Rücksicht der räumlichen Auffassung der F l ä c h e im Wesentlichen zu demselben Resultat führen, und können sich auch gegenseitig controliren.

841. Wir können nun sagen: die Seele stellt sich zunächst alle Gegenstände flächenhaft in einer Horopterebene vor, die durch die Dimensionen der Länge (Höhe) und Breite charakterisirt ist. Derjenige Complex von Empfindungen, welcher von einem einzelnen Retinabilde herrührt, bildet ein geschlossenes Ganze, während verschiedene Complexe, die von verschiedenen räumlich getrennten

*) Lehrb. der Ophthalmologie.

Retinabildern herrühren, auf der bezeichneten Ebene in einem bestimmten Abstande voneinander vorgestellt werden. Denken wir uns also, dass die Retina an verschiedenen Orten von den Bildern zweier Gegenstände zugleich gereizt wird, und dass das Auge sich abwechselnd dem einen und anderen Gegenstande zuwendet, um deren Bilder nacheinander auf den empfindlichsten Theil der Retina zu bringen; so können wir annehmen, dass die Reihe von Muskelempfindungen, welche sich bei der Bewegung des Auges von einem Gegenstande zum andern in der Seele erzeugt, zum Masse des Abstandes und zugleich als Mittel dient, um die beiden gegebenen Complexe von Lichtempfindungen im Vorstellen auseinanderzuhalten. Je kleiner aber der Abstand beider Gegenstände im Raume ist, desto geringer wird auch der Abstand ihrer Bilder auf der Retina und daher auch um so geringer die Drehung des Auges sein, welche nöthig ist, damit beide Bilder, zum Behufe deutlicher Auffassung, nacheinander auf die Mitte der Retina gelangen.

342. Wir sehen die Gegenstände aufrecht, obschon ihre Bilder auf der Retina verkehrt liegen. Man hat erkannt, dass dieser Umstand für das räumliche Vorstellen völlig bedeutungslos sein würde, wenn eben nur der Gesichtssinn existirte. Wir könnten dann mit dem Physiologen Joh. Müller sagen, dass das Auge nicht blos ein vereinzeltes Object, sondern gleichzeitig alle Objecte seiner Umgebung, die sich ebenfalls verkehrt auf der Netzhaut darstellen, umkehre, und dass, wo alles verkehrt gesehen werde, dies gar nicht zum Bewusstsein komme, da die Ordnung der Theile sonst unverändert bleibe. Allein wir erhalten auch durch die Tastwerkzeuge eine Vorstellung von der räumlichen Stellung der äusseren Objecte, und so namentlich auch die Beziehungen des Rechts und Links, des Oben und Unten, je nach der Richtung, in welcher das Tastorgan bewegt werden muss, um einen Gegenstand zu berühren. Es würde nun in dieser Hinsicht ein Widerspruch zwischen den räumlichen Auffassungen des Gesichts- und Tastsinnes entstehen, wenn die Seele in ihrem Vorstellen die Stellung der Gesichtsobjecte unmittelbar durch die Lage der Netzhautbilder bestimmte, oder, mit andern Worten, wenn wir Alles verkehrt sähen. Dass wir die Gegenstände wirklich aufrecht sehen, in demselben Sinne, wie es den Erfahrungen des Tastsinnes entspricht, lässt sich auch aus dem bekannten Beispiele entnehmen, dass wir

durch ein astronomisches Fernrohr wirklich alle Objecte verkehrt erblicken.

Reden wir von dem Rechts und Links, dem Oben und Unten mit Rücksicht auf die Mitte der Netzhaut, so entspricht der linken und unteren Seite des Objects die rechte und obere Seite des Bildes, und umgekehrt. Daher muss sich das Auge, wenn die rechte Seite der Netzhaut von Lichtstrahlen afficirt wird, die von der linken Hälfte eines Objects ausgehen, nach links drehen, um diese Hälfte des Objects auf die Mitte der Netzhaut und somit zur deutlichsten Wahrnehmung zu bringen. Und umgekehrt verhält es sich, wenn die linke Seite der Netzhaut von Strahlen getroffen wird, die von der rechten Hälfte der Fläche herkommen. Die von der unteren Hälfte der letzteren kommenden Strahlen afficiren aber die Netzhaut oben und veranlassen eine Bewegung des Auges nach unten, um die unteren Theile der Fläche auf die empfindlichste Stelle der Netzhaut zu bringen, wogegen eine Bewegung des Auges nach oben geschieht, wenn die untere Seite der Netzhaut durch Strahlen erregt wird, die von den oberen Theilen der Fläche ausgehen. So erhält nun der ganze Complex von Lichtempfindungen, der einem bestimmten Netzhautbilde entspricht, durch die Muskelempfindungen, welche aus jenen Bewegungen des Auges resultiren, eine Beziehung auf ein Rechts und Links, so wie auf ein Oben und Unten, ganz in derselben Weise, wie es durch den Tastsinn geschieht. In diesem Betracht kann man sagen, dass die verkehrten Bilder auf der Netzhaut zum Aufrechtsehen der Objecte sogar nothwendig sind.*)

Kehren wir hier noch einmal zurück zu unserer Horopterebene, so können wir uns nun kurz dahin aussprechen, dass in derselben die räumliche Stellung der Objecte durch die Drehungen des Auges um die vertikale Höhen- und horizontale Queraxe bestimmt wird. Die Drehungen um die erstgenannte Axe führen die Beziehung des Rechts und Links, die um die andere die Beziehung des Oben und Unten ein.

343. Was nun die dritte oder sog. Tiefen-Dimension körperlicher Gestalten angeht, so hält man zu deren Auffassung den Tastsinn vorzugsweise geeignet, weshalb man ihn wohl auch den Körpersinn zu nennen pflegt. Gewiss ist es hierbei von Bedeu-

*) Vgl. Lotze, Medicinische Psychologie, Leipz. 1852. S. 362 ff.

tung, dass das vornehmste Werkzeug des Tastens, die Hand, sowohl im Ganzen (beim Umfassen oder Umspannen der Körper) als auch in ihren fein gegliederten Theilen mannigfach gebraucht werden kann. Und man weiss ja, dass der Blindgeborene dadurch die Vorstellungen bestimmter Körpergestalten gewinnt. Zwar kommt man auch durch das Auge in Folge der Licht- und Schattenvertheilung, die sich bei der Drehung eines Körpers in bestimmter Weise verändert, zur Vorstellung des Körperlichen, jedoch, wie man noch vielfach meint, nicht so bestimmt als durch den Tastsinn, und gewiss nicht ohne Beihilfe des letzteren. Bestimmte Vorstellungen von körperlichen Gestalten, Dimensionen und Entfernungen der Gegenstände sollen erst durch unsere eigene Bewegung im Raume: nach den Gegenständen hin und von ihnen hinweg, oder auch, wenn die letzteren gross sind, durch eine Bewegung um sie herum gewonnen werden.

Andererseits ist man, namentlich seit dem Studium der stereoskopischen Erscheinungen, von Neuem auf die Convergenz der Sehaxen zurückgekommen, um deren Bedeutung für die Auffassung der Tiefendimension darzulegen. Bekanntlich (S. 357 f.) schliessen diese Axen, wenn sie in einem Punkte des fixirten Objects sich durchschneiden, einen Winkel miteinander ein, der bei nahen Objecten grösser als bei entfernteren ist. Nun weiss man aber von diesem Winkel nur auf dem Wege wissenschaftlicher Reflexion; sonst hat man gar kein Bewusstsein weder von der Convergenz der Sehaxen überhaupt noch von der Grösse des Winkels, den die convergirenden Axen beim Fixiren eines Objects miteinander bilden. Dennoch unterliegt es auf Grund positiver Erfahrungen (S. 390 f.) keinem Zweifel, dass der Convergenzwinkel der Sehaxen in einem gewissen Zusammenhange steht mit unserem Urtheil über die Entfernung der Gesichtsobjecte von uns, und zwar auch dann, wenn man von diesem Winkel gar keine Kenntniss besitzt. Im Allgemeinen erscheint uns ein fixirter Punkt um so näher, je grösser der Convergenzwinkel, und desto entfernter, je kleiner dieser Winkel ist, oder je mehr sich die Sehaxen dem Parallelismus nähern müssen, um in den betreffenden Punkt einzuschneiden.

344. Etwas näher kommt man dem Verständniss durch Berücksichtigung der Thatsache, dass die Convergenz der Sehaxen, nämlich die Einstellung derselben auf einen Punkt des zu sehenden Objects, also auch die Herstellung eines bestimmten Conver-

genzwinkels, je nach der wirklichen Entfernung des Objects, mit einer mehr oder minder bedeutenden Anstrengung der Augen, d. h. mit einer Muskelzusammenziehung verbunden ist, die eine bestimmte, aber je nach dem Betrage der Sehaxenconvergenz verschiedene Empfindung veranlasst. Diese Empfindung geht nun wohl ohne Zweifel als ein Glied in unser Urtheil über die Entfernungen ein, allein man kann doch nicht behaupten, dass dadurch die Vorstellung der Entfernung unmittelbar bestimmt werde. Ganz ähnlich verhält es sich mit den Empfindungen, welche die Accommodation des Auges für nähere und entferntere Objecte hervorbringt. Wenn das Auge von den Lichtstrahlen eines Objects gereizt wird, hat es das Bestreben, sich dergestalt zu verändern oder einzurichten, dass ein deutliches Bild des Objects auf der Netzhaut entsteht. Mit dieser Einrichtung (Accommodation) des Auges ist gleichfalls eine Empfindung verbunden, die verschieden ist, je nachdem das Auge sich für nähere oder fernere Objecte einrichtet. Auch diese Empfindungen üben einen bestimmten Einfluss auf unser Urtheil über die Entfernung der Gesichtsobjecte von uns; allein auch von ihnen kann man nicht geradezu sagen, dass sie die Vorstellung der Entfernung unmittelbar bestimmen.

Gewiss nehmen wir durch den Gesichtssinn nicht unmittelbar Entfernungen wahr; und es ist auch nicht einmal wahrscheinlich, dass die eben besprochenen Empfindungen ursprünglich und sofort die Vorstellung bestimmter Entfernungen herbeiführen, zumal da das Kind, wie man bemerkt hat, zunächst nach Allem ohne Rücksicht auf dessen Entfernung greift. Doch ist in diesem Falle, genauer erwogen, nicht zu verkennen, dass das Kind auf irgend eine Weise schon ein Vorstellen der Objecte nicht allein in ihrem Nebeneinander, sondern auch in ihrem Hintereinander gewonnen hat. Freilich irren sich Kinder gar sehr in ihrem Urtheil über den Abstand der Objecte, namentlich bei grösseren Entfernungen; aber sie haben doch schon eine Vorstellung von Entfernungen, der nur in Ermangelung gewisser Erfahrungen die Bestimmtheit des Masses abgeht, nach welchem Erwachsene die Entfernungen sicherer abschätzen können. Die genauere und weitere Ausbildung im Vorstellen der Tiefendimension wird wohl allerdings erst allmälig durch unsere freie Beweglichkeit im Raume auf bestimmte Weise herbeigeführt. Sonst kann es kaum einem Zweifel unterliegen, dass Kinder, noch ehe sie mit Sicherheit laufen können, sich die Ge-



genstände schon ziemlich richtig in ihren räumlichen Verhältnissen vorstellen. An Kindern, die auf dem Fussboden eines Zimmers umherrutschen, kann man sehr wohl wahrnehmen, dass sie zu einem Gesichtsobjecte, von dem sie gereizt werden, hineilen und auch öfter die Hand nicht eher nach demselben ausstrecken, bis sie in dessen unmittelbare Nähe gekommen sind, so dass sie ihn mit einem Griffe sicher erhaschen können.

345. Wie nun das Kind durch den Tast- und Muskelsinn zum Vorstellen der Entfernung der Objecte von ihm gelangen kann, ist bekanntlich eben nicht schwer einzusehen. Zunächst fährt das Kind mit seinen Armen unbestimmt umher; es berührt unwillkürlich sein Gesicht und andere Theile seines Leibes, von denen es allmälig durch ganze Complexe von Tastempfindungen auch eine bestimmte Vorstellung gewinnt. Berührt es den eigenen Leib, so erhält seine Seele zwei Empfindungen: eine von Seiten der tastenden Hand, die andere von Seiten des berührten Körpertheils, bei Berührung eines fremden (äusseren) Objects aber nur eine Empfindung. Und dieser Umstand führt bekanntlich zur Unterscheidung des eigenen Leibes von den äusseren Objecten. Gesetzt nun, die Hand treffe nach Berührung des eigenen Leibes, etwa des Gesichtes, zufällig ein äusseres Object, und es geschehe ferner, dass sie abwechselnd zwischen dem Leibe und dem Gegenstande hin- und herfahre; so entsteht während der Bewegung des Armes eine Reihe von Muskelempfindungen, die sich zwischen die Wahrnehmungen des Leibes und des Gegenstandes einschiebt und somit beide im Vorstellen auseinander hält. Das Tastbild des fremden Gegenstandes findet sich am Ende dieser Reihe von Muskelempfindungen, die vom berührten Leibesgliede zu dem Gegenstande selbst hingeht, während dieselbe Reihe, in umgekehrter Ordnung ablaufend, sich in das Tastbild des eigenen Leibes einfügt.

346. Wir fanden (S. 515) zwischen den Auffassungen des Gesichts- und Tastsinnes eine gewisse Analogie, dergestalt, dass beide in Rücksicht der Flächenvorstellung im Wesentlichen zu demselben Resultate führen müssen. Und so eben zeigte sich, dass wir durch den Tast- und Muskelsinn auch zur Vorstellung des Abstandes der Dinge von uns selbst gelangen können. Sollen nun auch in ähnlicher Weise die Empfindungen, welche aus der Accommodation des Auges resultiren, eine Vorstellung von der Entfernung der Gesichtsobjecte bewirken, so müssen dieselben, wenn

man nicht etwa in dieser Hinsicht auf eine verborgene Einrichtung der Seele reflectiren will, von der letzteren in der Form einer Reihe percipirt werden, wie dies wohl mit den Muskelempfindungen geschieht, die entstehen, wenn die Hand den Raum zwischen zwei Objecten oder den Raum zwischen uns und anderen Objecten durchtastet. Bieten sich dem Auge zwei ungleich entfernte Gegenstände zugleich dar, und stellt sich nun dasselbe abwechselnd für den einen und anderen ein, indem es bald diesen, bald jenen schärfer auffasst; so wird zwar die Einstellung für den fernen Gegenstand eine andere Empfindung begleiten, als die Einstellung für den näheren; allein man sieht, wie schon bemerkt, nicht ein, wie diese verschiedenen Empfindungen sofort zu einer Vorstellung von der ungleichen Entfernung beider Objecte von uns Anlass geben können, es sei denn, dass die wechselnde Accommodation für den näheren und ferneren Gegenstand durch eine Reihe allmäliger Uebergänge führe, die, wenn das Sehen einen gewissen Grad der Ausbildung erreicht hat, immerhin so rasch geschehen mögen, dass es den Anschein hat, als ob das Sehen der Objecte in verschiedenen Entfernungen (von uns), so zu sagen, mit einem Schlage von Statten gehe. Gesetzt nun, der festen Einstellung des Auges für ein Object gehe eine Reihe von Veränderungen voraus, die von gewissen, aber qualitativ unbestimmten Empfindungen begleitet seien, so dass die scharfe Gesichtsvorstellung erst eintrete nach dem wie immer schnellen Ablaufe jener Reihe von Empfindungen, so könnte man wohl sagen, dass durch die Länge dieser Reihe, falls sie nämlich mit wachsender Entfernung des Objects zunähme, die Vorstellung des Abstandes dieses letzteren (von uns) bestimmt werde. Allein dies erscheint insofern ganz ungewiss, als man nicht behaupten kann, dass die feste Einstellung des Auges für ein entfernteres Object eine längere Reihe von vorausgehenden Veränderungen des Auges erfordere als die feste Einstellung desselben für ein näheres Object. Und ebenso ist es, wenn man diese Betrachtung auf die Empfindungen bezieht, welche der veränderlichen Convergenz der beiden Sehaxen entsprechen.

347. Doch können wir diesen Gegenstand noch auf eine andere Weise in Erwägung ziehen. Es ist wahrscheinlich, dass das menschliche Kind verhältnissmässig schon frühzeitig nicht allein zum Auffassen vertikaler, sondern auch zu dem horizontaler Flächen gelangt. Nun kommt in die Vorstellung der letzteren die

Beziehung auf ein Rechts und Links in derselben Weise wie bei jenen, nämlich durch die Bewegung des Auges nach rechts und links. Das Auge muss sich nach rechts wenden, um die rechte, es muss sich nach links bewegen, um die linke Seite einer horizontalen Fläche genauer wahrnehmen zu können. Anders verhält es sich dagegen mit der Längen- oder Tiefendimension einer solchen Fläche.

Ein Gegenstand *ab* stehe vertikal auf einer horizontalen beleuchteten Ebene, deren verschiedene Punkte gleichzeitig mit denen des Gegenstandes *ab* Lichtstrahlen ins Auge senden. Die horizontale Linie *cb* sei die Entfernung des vertikalen Objects *ab* vom Sehenden, dessen Auge sich oberhalb der horizontalen Ebene befinde.

Fig. 188.

b c

Nun bildet sich die horizontale Strecke *bc* ebensowohl als die vertikale *ab* auf der Netzhaut des Auges ab, so dass hier ein Gesammtbild entsteht, worin die horiontale *bc* gleichfalls vertikal liegt. Das Bild des Gegenstandes *ab* ist verkehrt; wir sehen aber den Gegenstand dennoch aufrecht, weil das Auge, wie wir wissen, sich nach unten drehen muss, um den unteren Theil des Gegenstandes, und nach oben, um den oberen Theil desselben deutlich wahrzunehmen. Dagegen sind zum deutlichen Wahrnehmen der verschiedenen Theile der horizontalen Strecke *bc* zum Theil andere Thätigkeiten des Auges erforderlich. Wenn der Blick längs der Strecke *cb* hin und hergleitet, ändert sich fortwährend die Accommodation des Auges und beim Gebrauch beider Augen auch der Convergenzwinkel der Sehaxen, welcher letztere bei Auffassung der näher an *c* gelegenen Punkte grösser und beim Wahrnehmen der entfernteren Punkte immer kleiner wird. Indem nun die Empfindungen, welche diesen successiven Veränderungen des Auges entsprechen, sich mit den Lichtempfindungen der Linie *bc* verbinden, entsteht die Vorstellung der Strecke *bc*, deren von *ab* veschiedene Richtung im Vorstellen bedingt ist durch die Verschiedenheit, welche zwischen den aus der Accommodation und Sehaxenconvergenz resultirenden Empfindungen und jenen anderen Empfindungen besteht, die durch die Drehung des Auges beim Auf- und Abwärtsgleiten des Blickes längs *ab* erzeugt werden.

348. Denken wir uns nun ein Kind vor einem Tische befindlich, auf dessen Platte der Gegenstand *ab* (Fig. 188) steht, den

es mit der Hand nicht erreichen kann. Die Hand befinde sich bei *c* und biete sich gleichzeitig der Wahrnehmung des Kindes dar. Ruht nun der Blick des letzteren auf *c*, so sieht es die Hand deutlich, nicht aber auch zugleich den Gegenstand *ab*. Gleitet jetzt der Blick nach dem Gegenstande hin, und zwar auf der Tischplatte längs der Linie *cb*, so gelangen in raschem Nacheinander alle Theile dieser Linie zur deutlichen Wahrnehmung. Zugleich gewinnt das Gesichtsbild von *ab* an Deutlichkeit, und diese erreicht das Maximum, wenn der Blick bei *b* angelangt sich ganz dem Gegenstande zuwendet. Kehrt jetzt der Blick zurück von *b* nach *c*, so wird das Gesichtsbild von *ab* wieder undeutlicher, während das der Hand schärfer hervortritt. Ist nun auf diese Weise eine deutliche Vorstellung der Strecke *bc* gewonnen, so wird sich auch die Seele des Kindes den Gegenstand *ab* und die Hand als getrennt durch die Strecke *bc* vorstellen. Dieselben Vorgänge werden natürlich auch dann stattfinden, wenn das Kind auf dem Fussboden eines Zimmers sitzt und den Blick zwischen seiner Hand (oder seinem Fusse) und beliebigen vertikal stehenden Objecten längs des Fussbodens hin- und hergleiten lässt. So könnte die Seele des Kindes zunächst zu bestimmten Distanzvorstellungen mit Hilfe sichtbarer Strecken gelangen, und die hierbei gewonnenen Erfahrungen nachher auf leere Distanzen übertragen, d. h. auf solche, welche sich nicht auf der Netzhaut des Auges als Lichtstrecken darstellen, wobei dann die Empfindungen, welche aus der Accommodation und Sehaxenconvergenz der Augen hervorgehen, die Hauptrolle spielen würden. Es werden sich nämlich auch hier zwischen diesen Empfindungen und bestimmten (zunächst sichtbaren) Entfernungen gewisse Associationen gebildet haben, die einmal befestigt auch dann noch ihren Dienst leisten, wenn die Entfernungen der Gegenstände von uns selbst keinen Complex von Lichtempfindungen darbieten, also sog. leere Distanzen sind. Indem aber das Auge sich der Entfernung eines Gegenstandes anpasst, um ein deutliches Bild des letzteren auf der Netzhaut zu erzeugen, reproducirt die damit verbundene Empfindung jener Art die Vorstellung der Entfernung selbst.

Sei die Vorstellung der Entfernung *bc* des Objects *ab* auf die oben bezeichnete Weise gewonnen. Indem sich nun das Auge auf das Object *ab* einstellt, entsteht vermöge der Accommodation oder beim gleichzeitigen Gebrauch beider Augen wegen der Sehaxenconvergenz eine bestimmte Empfindung, die von der Seele percipirt

wird und sich mit der Vorstellung der Entfernung bc associirt. So werden sich zahlreiche Associationen zwischen bestimmten derartigen Empfindungen und den Vorstellungen bestimmter Entfernungen bilden; wobei es nicht ausbleiben kann, dass eine und dieselbe Empfindung, welche einer bestimmten Accommodation und einer bestimmten Sehaxenconvergenz entspricht, sich mit der Vorstellung einer und derselben Strecke von gleicher Länge, aber von verschiedener Färbung associirt. Die Folge davon wird aber die sein, dass diese verschiedenen Färbungen in der Seele als bedeutungslos zurücktreten, d. h. sich gegenseitig hemmen und auslöschen, während nur noch die Vorstellung der gleichen Entfernung als solcher fortbesteht und mit der ihr entsprechenden Empfindung associirt bleibt. Wenn das Auge sich dann auf irgend ein Object ohne Weiteres einstellt, so wird die bezeichnete Empfindung, welche hierbei entsteht, auch die mit ihr associirte Vorstellung der Entfernung sofort reproduciren.

349. Die weitere Ausbildung und Vollendung bestimmter Distanzvorstellungen wird nun allerdings erst gewonnen durch unsere eigene Beweglichkeit im Raume und zum Theil auch durch die Beweglichkeit der Gegenstände selbst, von denen wir bereits distincte Vorstellungen erlangt haben.

Beim Kinde muss sich schon frühzeitig, sobald es die ersten rohen Vorstellungen verschiedener Gegenstände gewonnen hat, ein Unterschied geltend machen zwischen einem Gegenstande, den es mit den Händen greifen kann, und einem solchen Gegenstande, den es zwar sieht, aber nicht greifen kann. Schon hierin findet das Kind eine baldige Veranlassung, sich beide Gegenstände als hintereinander liegend vorzustellen, und zwar den Gegenstand, den es berührt und zugleich sieht, als den näheren, und den anderen, den es nur sieht, aber nicht berühren kann, als den entfernteren, ohne doch darum schon ganz bestimmte Vorstellungen von den Distanzen dieser Gegenstände zu haben. Bestimmtere Distanzvorstellungen mag das Kind zunächst innerhalb des Raumes gewinnen, den es mit seinen Händen durchschneiden kann. Hier bieten sich ihm die Gesichtsobjecte theils von selbst bis zur Berührung dar, theils muss es nach ihnen greifen, um sie mit der Hand fassen und etwa nach dem Munde führen zu können, was je nach der wirklichen Entfernung dieser Objecte eine mehr oder minder bedeutende Ausstreckung des Armes erfordert und weiterhin auch

eine Mitbewegung des übrigen Körpers zur Folge hat. Nun dienen die Muskelempfindungen des bewegten Armes, je nachdem dieser mehr oder weniger ausgestreckt wird, zu einem unwillkürlichen Masse für die verschiedene Entfernung der Gesichtsobjecte, welche das Kind noch mit seiner Hand erreichen kann, während es sich solche Objecte, die auf diese Weise nicht zu erreichen sind, in unbestimmter Ferne vorstellt. Ausser den Objecten, die sich dem Kinde innerhalb des bezeichneten Raumes zum Ergreifen darbieten, wird ihm gelegentlich auch die eigene Hand zu einem Gesichtsobject, das in verschiedenen Entfernungen zur Wahrnehmung des Auges gelangt. Das Kind führt die Hand zum Munde, noch ehe es davon eine bestimmte Gesichtsvorstellung hat. Ist aber die letztere bis zu einem gewissen Grade ausgebildet, und wird dann die Hand, während die Augen auf dieselbe gerichtet sind, aus einer gewissen Entfernung zum Munde hingeführt, so verändert sich beständig die Accommodation des Auges und der Convergenzwinkel der Sehaxen. Gewinnt nun die Seele des Kindes, indem sich die Hand seinem Auge nähert oder von ihm entfernt, durch die Muskelempfindungen von Seiten des bewegten Armes und zugleich durch die veränderte Gesichtswahrnehmung eine Vorstellung von der Entfernung der Hand, so werden sich hiermit die Empfindungen associiren, welche daraus entspringen, dass das Auge sich unwillkürlich verändert, um nacheinander ein deutliches Netzhautbild der in verschiedenen Entfernungen befindlichen Hand zu erzeugen. Die Vorstellung der Nähe associirt sich mit der Empfindung, die aus der Accommodation für die Nähe oder aus der Herstellung eines grösseren Convergenzwinkels beider Sehaxen hervorgeht, und die Vorstellung der grösseren Ferne mit der Empfindung, die aus der Accommodation für diese grössere Ferne oder aus der Herstellung eines kleineren Convergenzwinkels resultirt; daher denn auch diese Associationen, wenn sie einmal befestigt sind, innerhalb der bezeichneten Grenzen zur Reproduction verschiedener Entfernungen durch jene Empfindungen Anlass geben werden.

350. Kann sich aber das Kind schon selbstthätig bewegen, so wird es mittelst des Auges auch die Wahrnehmung machen, dass die Strecke zwischen ihm (resp. seinem Fusse) und einem Gesichtsobjecte, zu dem es sich auf horizontalem Boden hin bewegt, immer kürzer wird, wogegen ihm umgekehrt die sichtbare Strecke, durch welche es auf demselben Boden von einem Objecte

getrennt ist, immer grösser werden muss, wenn es sich von dem Objecte entfernt, ohne dieses ganz aus dem Auge zu verlieren. Zugleich kann auch die Reihe der Muskelempfindungen, die sich in Folge der Bewegung erzeugt, eine Vorstellung der Entfernung oder des zurückgelegten Weges herbeiführen. Hat sich nun das Kind innerhalb gewisser Grenzen schon vielfach zwischen bestimmten Objecten hin und her und an ihnen vorüber bewegt, so kann es wohl nicht ausbleiben, dass in der Seele des Kindes, wenn dasselbe von einem gewissen Standpunkte aus auf das eine oder andere jener Objecte hinblickt, mit der Vorstellung einer bestimmten Entfernung sich die Vorstellung einer bestimmten Grösse des Objects und gleichzeitig auch die Empfindungen associiren, welche bei der Einstellung der Augen auf dieses Object aus der Accommodation und Sehaxenconvergenz entstehen.

351. Nähert sich dem Kinde ein fremdes Object mehr und mehr, so nimmt dessen Netzhautbild fortwährend zu, und es selbst, das Object, erscheint demgemäss in der Vorstellung grösser. Zugleich wächst die Accommodation des Auges für die Nähe, wie auch der Convergenzwinkel der Sehaxen, und beide Vorgänge erreichen, nebst den ihnen entsprechenden Empfindungen, ein gewisses Maximum, wenn sich der Gegenstand bis zur Berührung genähert hat. Eben so ist es, wenn das Kind, während es umhergetragen wird, einem ins Auge gefassten Gegenstande bis zur Berührung nahe kommt. Entfernt sich aber ein und derselbe Gegenstand weiter und weiter vom Kinde, so wird das Netzhautbild dieses Gegenstandes immer kleiner, während sich zugleich die Accommodation des Auges und der Convergenzwinkel der Sehaxen der wachsenden Entfernung gemäss ändern. Wenn nun die Empfindungen, welche aus der Accommodation und Sehaxenconvergenz hervorgehen, unsere Distanzvorstellungen nicht unmittelbar bestimmen, lässt sich auch nicht sagen, dass das Kind da, wo sich ein Gegenstand immer weiter von ihm entfernt, sofort eine Vorstellung wachsender Entfernung gewinnen werde, sondern alles, was hierbei stattfinden wird, ist das allmälige Kleiner- und Undeutlichwerden des Gegenstandes, sowie die Veränderung in der Accommodation des Auges, wenn dieses den Gegenstand weiter verfolgt. Und eben so wenig wird sich bei der beständigen Annäherung eines selben Gestandes sofort die Vorstellung einer immer kleiner werdenden Distanz bilden, sondern der Gegenstand wird allmälig

grösser und deutlicher erscheinen, und zugleich die Accommodationsempfindung diejenige Veränderung erfahren, welche dem Sehen des näheren Gegenstandes entspricht. Nur mit Hilfe der oben besprochenen Associationen werden die bezeichneten Empfindungen die Vorstellung einer wachsenden oder abnehmenden Distanz hervorrufen können. Diese Associationen werden sich aber von dem Moment an bilden, wo das Kind bei der Annäherung und Entfernung eines Objects nicht allein dieses, sondern auch die sichtbare Strecke ins Auge fasst, welche zwischen ihm und dem Object gelegen ist. Hat das Kind von dieser Strecke erst einmal eine Vorstellung gewonnen (s. S. 521 f.), so wird es auch der Veränderung inne werden, welche dieselbe erfährt, wenn das Object sich ihm nähert oder von ihm entfernt.

Die wechselnde Annäherung und Entfernung eines Objects wird dann weiterhin die Folge haben, dass das grössere Gesichtsbild und die Accommodationsempfindung für die Nähe auf eine geringere Distanz des Objects, und das kleinere Gesichtsbild und die Accomodationsempfindung für die Ferne auf eine grössere Distanz desselben bezogen wird, und zwar ohne weitere Reflexion, lediglich mit Hilfe einer unwillkürlichen Association.

352. Auch das Umhertragen des Kindes zur Zeit, wo es der eigenen (selbstthätigen) Ortsveränderung noch unfähig ist, kann schon eine gewisse Bedeutung für die Auffassung der Tiefendimension haben. Wird dasselbe an einer Reihe von Objecten, die schon im Anfange der Bewegung alle in seinem Gesichtsfelde liegen mögen, vorüber getragen, so werden sie nach einander schärfer zur Wahrnehmung gelangen, und auch im Vorstellen des Nacheinander bestimmter auseinandertreten, falls es dem Kinde möglich ist, auf die zwischen diesen Objecten sichtbaren Strecken sein Augenmerk zu richten. Es bildet sich dann, bei wiederholtem Hin- und Hertragen, eine bestimmte Reihe des Vor- und Hintereinanderliegenden, insofern die Objecte, die dem Gesichtssinne entschwunden, doch noch nicht ganz aus dem Vorstellen entwichen sind. Freilich werden solche Reihen anfänglich nur sehr kurz ausfallen, allmälig aber doch an Länge gewinnen. Auch mögen sich bei dieser Gelegenheit einige jener Associationen bilden.



Dagegen ist wohl nicht daran zu denken, dass die Körperempfindungen, welche während des Umhertragens im Kinde entstehen, im Verein mit den Gesichtswahrnehmungen auf ähnliche

Weise wie die Muskelempfindungen während des Gehens für die Auffassung der Tiefendimension wirksam werden. Was sich von jenen Empfindungen erwarten lässt, ist nur dies, dass das Kind durch dieselben zu einer baldigen Unterscheidung zwischen dem Zustande des Umhergetragenwerdens und dem Zustande des Liegens kommt. Zunächst werden die Bewegungszustände der Person, welche das Kind trägt, gewisse Affectionen des letzteren zur Folge haben, die nicht vorhanden sind, wenn dasselbe ruhig in seiner Wiege liegt. Und wenn es auch nur gewisse sanfte Erschütterungen sind, die der Körper des Kindes während des Umhertragens erfährt, so kann es doch schon allein dadurch, nämlich durch die Gefühle, welche diese Erschütterungen in der Seele bewirken, zu einer baldigen Unterscheidung zwischen den besagten Zuständen gelangen. Wahrscheinlich bedingt schon das wechselnde Heben und Aufsetzen der Füsse, und die damit verbundenen Veränderungen in der Hebung des Oberkörpers von Seiten der tragenden Person in dem Körper des Kindes gewisse Affectionen, die von dessen Seele percipirt zu einem gewissen Gefühle des sattfindenden Bewegungszustandes führen. Ist nun das Kind allmälig rüstiger geworden, hat es einige Fertigkeit im Gebrauche seiner Hände und in der festeren Haltung seines Oberkörpers gewonnen, so lässt sich auch schon eine gewisse Selbstthätigkeit desselben, wenn es umhergetragen wird, bemerken. Das Lustgefühl während des Umhertragens macht sich jetzt in bestimmter Weise geltend, so dass, wenn man in der Bewegung inne hält, das Kind selbst Anstrengungen macht, die entschieden auf ein Verlangen nach Fortsetzung der Bewegung hindeuten.

Beiläufig wollen wir hier in Hinsicht auf die Muskelempfindungen noch bemerken, dass dieselben, sowohl während des Gehens als auch bei dem mehr oder minder bedeutenden Ausstrecken des Armes, sich der Seele des Kindes wahrscheinlich stärker aufdringen als der Seele des Erwachsenen. Das Kind lernt bekanntlich erst allmälig mit Sicherheit greifen und laufen; die anfänglichen Bewegungen sind eben so unsicher als ungeschickt, und werden erst allmälig auf das schickliche Mass zurückgeführt. So ist es sehr wohl denkbar, dass die Seele von den Empfindungen, welche aus den Bewegungen der Gliedmassen resultiren, anfänglich mehr in Anspruch genommen wird als späterhin, nachdem durch fortgesetzte Uebung Fertigkeit im Gebrauche der Gliedmassen ge-

wonnen ist, so dass sie dann auf gegebenen Anlass ihren Dienst verrichten, ohne dabei sehr merklich zu werden. Und so mögen auch die Empfindungen, welche der Veränderung der Accommodation und Sehaxenconvergenz entsprechen, in der ersten Periode ihres Entstehens sich lebhafter als späterhin geltend machen, wo sie bereits als feste Glieder in den Mechanismus des räumlichen Vorstellens eingefügt sind.

353. Zu den oben (S. 522 ff.) besprochenen Associationen gesellen sich nun später, in Folge eigener (selbstthätiger) Bewegung des Kindes, noch andere.

Es ist bereits hervorgehoben, dass das Kleinerwerden eines sich immer weiter entfernenden Gesichtsobjects wahrscheinlich schon vom Kinde mittelst einer Accommodationsempfindung auf eine grössere Entfernung bezogen wird. Dies gilt jedoch nur bei einem und demselben Object, und es folgt daraus keineswegs etwa, dass kleinere Objecte überhaupt für entfernter als grössere gehalten werden müssten. Befindet sich das Kind in der Nähe eines Objects, das es berühren kann, und wendet sich dann sein Auge auf ein wirklich entfernteres Object, so wird ihm dieses immerhin entfernter als jenes erscheinen, sobald sich auf die angegebene Weise zwischen den Accommodationsempfindungen des Auges und dem Vorstellen der Entfernungen gewisse Associationen gebildet haben. Eine neue Association wird aber dadurch begründet, dass manche Gegenstände, von welchen das Auge gereizt wird, zur Zurücklegung eines verhältnissmässig sehr langen Weges veranlassen, bevor man sie erreichen und g e n a u e r betrachten kann. Solche Gegenstände erweisen sich dann als verhältnissmässig sehr grosse, und wenn man sich von ihnen entfernt, bleiben sie unter gleichen Umständen viel länger als andere, kleinere, deutlich sichtbar. So bildet sich denn durch Wiederholung derartiger Erfahrungen eine Association zwischen den Vorstellungen grosser Gegenstände und grosser Entfernungen. Dagegen verlieren sehr kleine Gegenstände schon in verhältnissmässig sehr geringer Entfernung beträchtlich an Deutlichkeit; sie müssen dem Auge verhältnissmässig sehr nahe kommen, damit von ihnen ein deutliches Bild auf der Netzhaut und demzufolge auch eine deutliche Vorstellung in der Seele entstehe. Dies führt nun zu einer Association zwischen den Vorstellungen kleiner Gegenstände und den Vorstellungen geringerer Entfernungen. Mit diesen Associationen verbinden

sich dann noch die Accommodationsempfindungen, die bei der Einrichtung des Auges für nahe und ferne Gegenstände hervortreten, so dass die Empfindung, welche aus der Accommodation des Auges für die Nähe entspringt, sich mit der Vorstellung einer geringeren Entfernung, und die Empfindung bei der Accommodation des Auges für die Ferne sich mit der Vorstellung einer grösseren Entfernung verknüpft.

354. Und aus solchen erfahrungsmässig gewonnenen Associationen, die einmal befestigt wie ein Mechanismus wirken, erklären sich auch jene Erscheinungen, die sich auf die Veränderung unserer Vorstellung von der Grösse und Entfernung eines Objects beziehen, wenn unter gewissen Umständen die Accommodation des Auges oder der Convergenzwinkel beider Sehaxen eine Veränderung erfährt.

Hierher gehören nachstehende, thatsächlich bekannte, Sätze: 1) Unter sonst gleichen Umständen, namentlich wenn der Gesichtswinkel, d. h. die Grösse des Netzhautbildes, und die Convergenz der Sehaxen unverändert bleiben, verkleinert sich in unserem Vorstellen ein Gesichtsobject mit wachsender Einrichtung des Auges für die Nähe. 2) Beim Sehen mit beiden Augen nimmt, alles Andere als gleich vorausgesetzt, die Grösse eines Gesichtsobjects um so mehr ab, je grösser der Convergenzwinkel der Sehaxen wird.

Als Beispiel für den ersten Satz dient ein bekannter Versuch. Man verschafft sich nämlich das Nachbild einer Kerzenflamme und richtet dann das Auge abwechselnd für die Ferne, indem man etwa auf einen entfernten Gegenstand sieht, und für die Nähe ein; dann scheint das Nachbild merklich an Grösse abzunehmen, wenn man vom fernen zum nahen Sehen übergeht, obgleich dabei die Grösse des Bildes auf der Netzhaut unverändert bleibt. In gleicher Weise erscheint ein entfernter Gegenstand, etwa das Fenster eines gegenüberstehenden Hauses, kleiner, wenn man das Auge für das Betrachten eines nahen Gegenstandes, z. B. eines in der Hand gehaltenen Bleistiftes, accommodirt; dagegen erscheint umgekehrt der nähere Gegenstand grösser, wenn man das Auge für den entfernteren Gegenstand accommodirt. Eben so erscheint die Schrift eines aufgeschlagenen Buches merklich kleiner, wenn man vor oder über derselben, in einer gewissen Entfernung davon, die Spitze einer Bleifeder scharf fixirt, u. s. w. Zugleich entsprechen den Veränderungen in der Vorstellung der Grösse unter den be

zeichneten Umständen gewisse Veränderungen in der Vorstellung der Entfernung. So erscheint uns das Nachbild einer Kerzenflamme näher oder ferner, je nachdem man das Auge für die Nähe oder Ferne accommodirt, und Gleiches gilt in anderen Fällen dieser Art.

Die eben beschriebenen Versuche gelingen, bei einiger Uebung im Fixiren, sehr leicht, mag man nun ein Auge oder beide Augen gebrauchen. Derselbe Zusammenhang aber, welchen die veränderte Accommodation des Auges zwischen den Vorstellungen der Grösse und Entfernung eines Objects verräth, zeigt sich auch mit grosser Bestimmtheit bei Veränderung der Sehaxenconvergenz. Man fixire, um hierüber einen einfachen Versuch anzustellen, mit beiden Augen einen Gegenstand, der sich in nicht zu grosser Entfernung vor oder hinter einem vertikal gestellten Rohrsessel befindet. Liegt nun der fixirte Punkt, in welchem sich die Sehaxen schneiden, diesseits des Rohrsessels, so erscheinen die Figuren des letzteren verkleinert und näher gerückt; liegt dagegen der Fixationspunkt jenseits des Rohrsessels, so rücken dessen Figuren nach jenem Punkte und erscheinen zugleich vergrössert*).

355. Dass nun unter sonst gleichen Umständen die Grösse eines Gegenstandes in unserem Vorstellen mit wachsender Einrichtung des Auges für die Nähe abnimmt, beruht darauf, dass kleine nahe Gegenstände das Auge nöthigen, sich für die Nähe einzurichten, damit ein deutliches Bild auf der Netzhaut entstehe, weshalb sich denn allmälig eine feste Association zwischen der Vorstellung einer geringeren Entfernung und der Vorstellung eines kleineren Objects bildet. Sind nun die Umstände von der Art, dass die Grösse des Netzhautbildes eines Objects oder dessen Sehwinkel unverändert bleibt, während das Auge sich für eine geringere Entfernung als die dem Object wirklich zukommende accommodirt, so reproducirt die Vorstellung dieser geringeren Entfernung die Vorstellung desselben Objects in kleineren Dimensionen. Die Vorstellung der geringeren Entfernung lässt sich aber selbst als eine reproducirte betrachten, insofern nämlich als das Einstellen des Auges für die Nähe eine Empfindung veranlasst, welche mit der Vorstellung einer geringeren Entfernung complicirt ist, so dass dann, wenn mit der Einrichtung des Auges für die Nähe diese Empfindung entsteht,

*) s. auch Abth. II. d. W. S. 390 ff.

auch die Vorstellung einer geringeren Entfernung reproducirt wird. Ganz ähnlich verhält es sich, wenn der Convergenzwinkel der Sehaxen zunimmt. Die hierbei auftretende Empfindung, welche bei der Einstellung der Sehaxen auf ein nahes kleines Object aus der Muskelzusammenziehung resultirt, complicirt sich mit der Vorstellung einer geringeren Entfernung, so dass auch hier mit wachsender Convergenz der Sehaxen die Vorstellung einer immer geringeren Entfernung und hierdurch wieder die Vorstellung eines kleineren Objects reproducirt wird, falls der Sehwinkel oder die Grösse des Netzhautbildes unverändert bleibt.

356. Das Gegenstück zu dem Vorstehenden bietet die Verminderung des Convergenzwinkels beider Sehaxen oder die Einrichtung des Auges für die Ferne. Hierdurch wird die Vorstellung einer grösseren Entfernung und damit auch die Vorstellung eines grösseren Objects reproducirt, wenn das Netzhautbild des Objects, auf welches die Aufmerksamkeit gerichtet, an Grösse dasselbe bleibt. Der letztere Umstand ist in diesem wie im vorigen Falle wesentlich. Entfernt sich ein Gegenstand von uns oder entfernen wir uns von ihm, so wird seine scheinbare Grösse, die sich nach dem Gesichtswinkel, d. h. nach der Grösse des Netzhautbildes bestimmt, kleiner, und wir stellen uns demgemäss auch den Gegenstand mit wachsender Entfernung als kleiner werdend vor. Allein bald machen wir auch, wie bereits bemerkt, die Erfahrung, dass in grösseren Entfernungen grössere Gegenstände überhaupt leichter und besser als kleinere gesehen werden können; und so bildet sich eine gewisse Association zwischen der Vorstellung grösserer Gegenstände und der grösserer Entfernungen. Werden wir nun irgendwie, z. B. durch die Accommodation des Auges für die Ferne oder durch verminderte Sehaxenconvergenz veranlasst, uns den Gegenstand, auf den wir die Aufmerksamkeit gerichtet haben, in einer grösseren Entfernung vorzustellen, so bedingt dies auch eine Vorstellung des Gegenstandes in grösseren Dimensionen, da die Grösse seines Netzhautbildes ungeachtet der grössern Entfernung, die wir uns nun vorstellen, doch unter den obwaltenden Umständen nicht kleiner geworden ist.

357. Eine mit dem Vorigen in naher Beziehung stehende Gesichtstäuschung ist die, dass nicht selten ein kleines Insect, das *seitlich* vor den Augen vorbeifliegt, für einen grossen Vogel in

der Ferne angesehen wird, während man auch umgekehrt entfernte grosse Gegenstände als nahe kleine zu sehen glaubt. Diese Täuschung ist bedingt durch den Accommodationszustand des Auges. Ist dieses zufällig für eine grössere Entfernung eingerichtet, während das Insect vor ihm vorüberfliegt, so reproducirt die entsprechende Accommodationsempfindung die Vorstellung einer grösseren Entfernung und damit auch die Vorstellung des Insects in grösseren Dimensionen, welches nur wegen der Unbestimmtheit (Undeutlichkeit) seines Netzhautbildes für einen Vogel gehalten wird. So kann auch eine Fliege an der Fensterscheibe für einen Raben auf dem Dache des gegenüberliegenden Hauses gehalten werden. Drobisch, der dieser Gesichtstäuschung gedenkt *), erläutert dieselbe gewiss ganz richtig, indem er sagt, dass das schwarze Fleckchen, welches das Bild der Fliege auf der Netzhaut hervorbringe, weder als Fliege noch als Rabe gesehen werde, sondern eben nur als ein schlechtbegrenzter Farbeneindruck von einer gewissen scheinbaren Grösse, die gleich gut für den Raben auf dem Dache wie für die Fliege auf dem Fenster passe. „An Hilfsmitteln, die Entfernung richtig zu bestimmen, fehlt es vielleicht im Augenblick, oder vielmehr die vorhandenen entscheiden sich für den Raben; die Adjustirung der Augen, der Winkel ihrer Axen ist gerade für eine grössere Entfernung eingerichtet. Darum reproducirt die Wahrnehmung jenes schwarzen Fleckchens, bei Voraussetzung dieser Entfernung, die Vorstellung des Raben und nicht der Fliege.“ Zwar sieht man, auf Grund der von uns oben hervorgehobenen Associationen, die Fliege auch als solche grösser und entfernter, wenn man das Auge für ein entfernteres Object fest einstellt, aber zur Vollendung der Illusion in dem besagten Falle ist es erforderlich, dass das Netzhautbild ein unbestimmtes ist, das eben so gut für den Vogel in der Ferne wie für das Insect in der Nähe passt. In diesem Falle entscheidet die Accommodationsempfindung für den Vogel, wenn das Auge zufällig für die Ferne eingerichtet ist, während das näher befindliche Insect plötzlich im Gesichtsfelde auftaucht.

358. Nach dem Vorstehenden gewinnt die Entfernung eines in unserem Gesichtsfelde befindlichen Objects etwas Unbestimmtes, wenn man ein anderes, näheres oder entfernteres, Object scharf

*) Empirische Psychologie, S. 117.

ins Auge fasst: es ist gewissermassen das Bestreben vorhanden, das nichtfixirte Object in die Ebene des fixirten zu versetzen. Davon erlangt man freilich unter gewöhnlichen Umständen kein deutliches Bewusstsein, weil die Aufmerksamkeit, wenn auch nur momentan, lediglich auf das eben fixirte Object gerichtet ist. Beim gewöhnlichen Sehen schweift der Blick im raschen Nacheinander von einem Object zum anderen, indem er bald dieses, bald jenes schärfer auffasst; wobei man sich der verschiedenen Entfernungen der Objecte voneinander und von uns bewusst wird. Und dieses Bewusstsein wirkt dem Bestreben entgegen, die nicht fixirten Objecte in die Ebene des Fixationspunktes (Horopterebene) zu versetzen. Zwar wird ein Object, das uns näher oder ferner liegt als ein anderes, welches wir fixiren, wegen der oben erläuterten Associationen nothwendig, sowohl in Hinsicht auf seine Grösse als auf seine Entfernung, eine gewisse Veränderung in unserem Vorstellen erfahren; allein diese Veränderung würde noch auffälliger sein als sie ist, wenn wir nicht in gar vielen Fällen, auf Grund schon gemachter Erfahrungen, bestimmt wüssten, dass uns das nichtfixirte Object näher oder ferner als das fixirte liegt.

359. Beim gleichzeitigen Gebrauche beider Augen treten die beiden Empfindungen, welche einerseits aus der Accommodation und andrerseits aus der Sehaxenconvergenz resultiren, zugleich auf. Doch werden sie deshalb nicht zu einer einzigen Empfindung mit einander verschmelzen, da es nicht eine und dieselbe Muskelthätigkeit ist, welche die Accommodation und Sehaxenconvergenz bewirkt. Und so lässt sich auch erwarten, dass unter gewissen Umständen der Gebrauch nur eines Auges manches Abweichende von dem beider Augen darbieten wird. Im Wesentlichen muss aber ein Auge, in Rücksicht auf das Vorstellen der Entfernung, zu demselben Resultate führen, als der Gebrauch beider Augen; höchstens wird man im letzteren Falle eine grössere Bestimmtheit erwarten können. Allein man kann nicht einmal schlechthin behaupten, dass man unter allen Umständen mit beiden Augen besser als mit einem Auge sehe. Freilich, wer gewohnt ist beide Augen in gleichem Masse zu gebrauchen, wird mit einem Auge minder gut sehen; aber es fehlt nicht an Personen, die vorzugsweise mit einem Auge sehen, indem sie sich gewöhnt haben, den Auffassungen des einen Auges vorzugsweise ihre Aufmerksamkeit zu schenken; und dies findet nicht blos da statt, wo zwischen

beiden Augen eine sehr abnorme Ungleichheit besteht. Die bekannte Anführung von der Schwierigkeit des Einfädelns einer Nähnadel mit nur einem Auge ist kein ganz allgemeines Factum; es gibt nicht wenige Personen, die in dieser Beziehung mit einem Auge eben so viel als mit beiden leisten. Indess soll mit dem Vorstehenden nicht gesagt sein, dass nicht in besonderen Fällen, so z. B. bei den stereoskopischen Erscheinungen, der Gebrauch beider Augen bedeutsam sei. Doch davon späterhin.

Bringt man einen stabförmigen, nicht zu dicken Körper, der gerade vor dem Angesichte stehen mag, dem letzteren näher, so wird der Convergenzwinkel der Sehaxen, wenn man den Körper mit beiden Augen fixirt, grösser, und die Herstellung der wachsenden Sehaxenconvergenz erfordert eine zunehmende Anstrengung der betreffenden Muskeln. Schliesst man dann ein Auge, so scheint das Object etwas in die Ferne zu rücken. Es ist mir nun überhaupt wahrscheinlich, dass die Empfindung, welche bei gleichzeitigem Gebrauche beider Augen aus der Convergenz ihrer Axen resultirt, indem letztere sich in einem Objecte schneiden, sich mit der Vorstellung einer geringeren Entfernung associirt, als diejenige Empfindung, welche bei Anwendung eines einzigen Auges entsteht, wenn dieses sich für dasselbe Object in demselben wirklichen Abstande wie dort accommodirt. Sonst scheint, wie in Hinsicht auf die Lage, so auch in Bezug auf die Entfernung bei gleichzeitiger Thätigkeit beider Augen, im Vergleich zum Sehen mit einem Auge, sich ein Mittleres herauszustellen, worüber man wohl einen Versuch in der Weise anstellt, dass man ein Stäbchen in einem gewissen Abstande vor das Gesicht hält und dann in ziemlich raschem Wechel bald das eine, bald das andere Auge schliesst, nachdem man diesen Körper zuvor mit beiden Augen fixirt hat. Steht derselbe, seitlich vom Gesicht, dem einen Auge viel näher als dem anderen, so rückt er aus seinem scheinbar mittleren Abstande merklich in die Ferne, wenn man das nähere Auge schliesst.

360. In Rücksicht der sog. positiven Accommodation (S. 283 f.), welche sich auf das deutliche Sehen verhältnissmässig naher Objecte bezieht, sei hier erinnert, dass dieselbe eine um so grössere Muskelanstrengung erfordert, je näher das Object an das Auge rückt, und in entsprechender Weise steigert sich diese Anstrengung zum Behufe der Darstellung eines deutlichen Bildes auf der Netzhaut, wenn ein Object an seinem Orte bleibt, aber die von

seinen einzelnen Punkten ausgehenden Lichtstrahlen, auf ihrem Wege zum Auge, durch ein eingeschobenes optisches Medium eine stärkere Divergenz gewinnen, wie dies der Fall ist, wenn man auf einen Gegenstand herabsieht, der sich im Wasser befindet, oder wenn man Gegenstände durch ein ebenes von parallelen Flächen begrenztes Glas betrachtet. Die Gegenstände erscheinen uns dann näher als mit blossem Auge angesehen, indem die aus der grösseren Muskelanstrengung resultirende Accommodationsempfindung die Vorstellung einer geringeren Entfernung reproducirt. Erfährt nun zugleich, wenn man beide Augen gebraucht, auch der Convergenzwinkel ihrer Sehaxen eine Vergrösserung, so wird die hiermit complicirte Empfindung die Erscheinung noch auffälliger machen, und kann sie sogar vorzugsweise bestimmen, falls die Sehaxenconvergenz durch das eingeschobene optische Mittel, im Verhältniss zur Accommodationsveränderung bedeutend vermehrt wird.

Diese Erscheinung*) des Näherrückens (oder der Hebung) von Gegenständen, die auf die besagte Weise durch Brechung gesehen werden, ist, wie neuerdings Dove**) gefunden, bei binocularer Betrachtung viel beträchtlicher, als bei monocularer. Derselbe legte zwei in lebhaften Farben ausgeführte gleiche Zeichnungen von nahe zwei Zoll Seite nebeneinander und stellte auf die eine einen klaren Glaswürfel von derselben Seite. „Binocular bei senkrechtem Herabsehen betrachtet, erschien die Fläche fast bis zur Hälfte gehoben als vollkommene Ebene, nach Schliessen des einen Auges trat sie fast genau in die Ebene der daneben liegenden Fläche zurück, nur etwas grösser erscheinend. Darauf wurde ein stark farbiger Glaswürfel von ein Zoll Seite unter den grossen klaren Glaswürfel gestellt. Bei binocularer Betrachtung erschien der Würfel als ein vierseitiges Prisma von fast doppelter Höhe, nämlich viel höher als der darauf stehende Würfel, bei monocularer beide Würfel als Würfel in ihren natürlichen Verhältnissen." Sodann entwarf Dove die senkrechte Projection einer abgekürzten vierseitigen Pyramide, deren quadratische Grundfläche gleich der des durchsichtigen Würfels war, mit einer Anzahl gleichweit abstehender Quer-

*) s. Moser im Repertorium der Physik, Bd. V. S. 393.

**) Optische Studien, Fortsetzung der in der Farbenlehre enthaltenen, Berlin 1859. S. 21.

schnitte. „Binocular erschien diese Projection im Glaswürfel gehoben als Ebene, monocular vertiefte sie sich hingegen zu der perspectivischen Ansicht eines tiefen vierseitigen Tunnels; da nämlich im Moment des Schliessens des einen Auges die Schnittfläche der Pyramide sich entfernt, so schienen die Kanten derselben mit ihren Endpunkten an die Vorderfläche des Glaswürfels sich anzulehnen.“

361. Die Grösse eines Gesichtsobjects ist durch die Grösse des Gesichtswinkels, d. h. durch die Grösse des entsprechenden Netzhautbildes oder, was dasselbe, durch die Anzahl der erregten Netzhautpunkte bedingt. Dieses Bild ist nun um so kleiner, je kleiner der Gegenstand und bei einem und demselben Gegenstande desto kleiner, je weiter derselbe entfernt ist. So werden denn auch einem Kinde entfernte Gegenstände, indem es sich deren Grösse auf Grund der kleinen Gesichtswinkel vorstellt, verhältnissmässig sehr klein vorkommen, und verhältnissmässig auch näher, wenn es in Ermangelung gewisser Erfahrungen noch keine bestimmte Vorstellung von der wirklichen Entfernung solcher Gesichtsobjecte gewonnen hat. Erst allmälig bildet sich, vermöge unserer freien Beweglichkeit im Raume, die Erfahrung, dass die grössere Entfernung mit einem kleineren Gesichtsbilde eines und desselben Objects verbunden ist, so wie auch eine gewisse Association zwischen den Vorstellungen grosser Gegenstände und grosser Entfernungen (S. 529 f.). Diese Associationen sind nun im Erwachsenen stets wirksam. Derselbe hat nicht allein von der Grösse der Gesichtsobjecte in sehr verschiedenen Entfernungen, sondern auch von den letzteren selbst bestimmte Vorstellungen gewonnen. Und so kann er denn auch bei der Wahrnehmung entfernter Gesichtsobjecte nicht den Täuschungen ausgesetzt sein, wie ein Kind, in welchem jene Associationen noch nicht fertig sind. Gleichwohl ist auch der Erwachsene noch mannigfachen Gesichtstäuschungen ausgesetzt, zu welchen manche der erwähnten Associationen selbst wieder Veranlassung geben. So ist es für die Beurtheilung der Entfernung von Bedeutung, dass uns die Gegenstände mit wachsendem Abstande von uns wegen der Lichtabsorption durch die Atmosphäre immer lichtschwächer und undeutlicher erscheinen, so dass sich die Vorstellung dieser Merkmale mit der Vorstellung einer grossen Entfernung verknüpft. Daher halten wir auch sehr ferne Gegenstände, wenn sie uns wegen grosser Durchsichtigkeit der

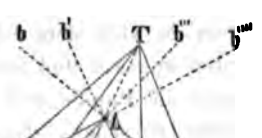
atmosphärischen Luft heller und deutlicher als sonst erscheinen, für näher, während umgekehrt bei trüber Luft die weniger deutliche Gesichtsvorstellung auf eine grössere Entfernung hindeutet. So stellen wir uns einen nahen Gegenstand, der plötzlich im Nebel vor uns auftaucht, viel entfernter vor, etwa in der Entfernung, die er bei heiterem Wetter haben müsste, um eben so undeutlich zu erscheinen. Da nun dessenungeachtet der Gesichtswinkel des nahen Gegenstandes unverändert bleibt, so erscheint uns dieser zugleich ungewöhnlich gross. Das Gegentheil geschieht, wenn entfernte Gegenstände in Folge einer grossen Durchsichtigkeit der Luft heller und deutlicher gesehen werden; sie erscheinen uns dann zugleich kleiner, weil ungeachtet ihrer scheinbar grossen Nähe doch ihr Gesichtswinkel, d. h. die Grösse ihrer Netzhautbilder, unverändert bleibt.

362. Sodann kommt für die Beurtheilung der Entfernung die Menge der Gegenstände in Betracht, die zwischen dem Auge und einem entfernten Gegenstande liegen. Je grösser die Anzahl der zwischenliegenden, unterscheidbaren Gegenstände ist, die das Auge beschäftigen, desto grösser schätzt man die Entfernung. Daher werden denn Entfernungen auf grossen gleichförmigen Ebenen oder auf einer ausgedehnten Wasserfläche meist für zu gering gehalten. Und so ist es auch ganz natürlich, dass ein Kirchthurm, der aus einer weiten Ebene oder hinter einem Berge hervorragt, bekanntlich näher erscheint als in dem Falle, wo das Auge noch Hügel und verschiedene Häuser- und Baumgruppen in dem Zwischenraume bis zum Thurme hin wahrnehmen kann. Eben hierher gehört die bekannte Erfahrung, dass uns Mond und Sonne, dicht am Horizonte bei ihrem Auf- und Untergange, merklich grösser erscheinen als wenn sie höher am Himmel stehen, obschon in beiden Fällen der Gesichtswinkel dieser Gestirne nahezu derselbe ist. Dieses Factum erklärt sich daraus, dass wir die horizontale Entfernung des Himmels wegen der vielen nach dem Horizonte hin befindlichen Gegenstände von bekannter Grösse und Entfernung für viel grösser halten als die vertikale Höhe desselben, bezüglich deren wir solche Gegenstände nicht wahrnehmen. Da wir uns also den dicht am Horizont stehenden Mond entfernter vorstellen, als wenn er hoch am Himmel steht, so haben wir hier den schon oben erläuterten Fall, dass uns nämlich ein Gegenstand bei unverändertem Gesichtswinkel desto grösser erscheint, je ent-

fernter wir uns denselben vorstellen. Begreiflicher Weise wird diese Täuschung noch auffallender hervortreten, wenn wir den Mond bei seinem Untergange durch eine trübe Atmosphäre hindurch betrachten. Sieht man aber durch ein Rohr, so fällt die Beziehung zu den am Horizont befindlichen Objecten fort, und der Mond erscheint uns dicht am Horizonte nicht grösser als sonst, sondern eher noch noch etwas kleiner.

363. Ein anderes Hilfsmittel zur Beurtheilung der ungleichen Entfernung verschiedener Objecte bietet endlich noch die sog. Parallaxe, nämlich die scheinbare Veränderung des Ortes eines Gegenstandes, den ein Beobachter von verschiedenen Standpunkten aus betrachtet. Ist in nebenstehender Figur *A* ein Baum und *T* ein entfernt stehender Kirchthurm, so wird ein Beobachter in *B* den Thurm in der Richtung *BT*, den Baum aber in der Richtung *Bb* sehen, so dass beide Objecte unter dem Winkel *TBb* erscheinen. Geht jetzt der Beobachter nach *B'*, so sieht er von hier aus den Thurm in der Richtung *B'T* und den Baum in der Richtung *B'b'*, also beide nun unter einem kleineren Winkel *TB'b'*.

Fig. 189.



In *B''* fallen die Gesichtslinien für beide Objecte zusammen; der Baum deckt zum Theil den Thurm und jener erscheint vor diesem. Noch weiter in *B'''* hat man die Gesichtslinien *B'''T* und *B'''b'''*. Der Baum erscheint nun rechts vom Thurme und entfernt sich von diesem immer mehr, je weiter der Beobachter nach links hin auf der Geraden *BB''''* fortschreitet. Kurz, der nähere Gegenstand scheint sich stets in einer Richtung zu bewegen, die der des bewegten Beobachters entgegengesetzt ist.

364. Nach unseren früheren Betrachtungen sind es die mit den reinen Lichtempfindungen associirten Muskelempfindungen, welche in den Complex der ersteren bestimmte räumliche Beziehungen bringen; so das Rechts und Links, das Oben und Unten durch die Drehungen des Auges um die vertikale Höhen- und horizontale Queraxe, während die Auffassung der Tiefendimension körperlicher Gestalten durch den Gesichtssinn allmälig aus den Muskelempfindungen resultirt, welche mit der Einstellung der Sehaxen und der Einrichtung des Auges für die näheren und entfern-

teren Punkte eines Objects verbunden sind (S. 521 ff.). So muss sich nun ein körperlicher Gegenstand allerdings von einer Abbildung desselben sogleich durch die Verschiedenheit unterscheiden, die man in der Convergenz der Sehaxen empfindet, je nachdem man einen mehr oder weniger entfernten Punkt des Gegenstandes fixirt; eine Verschiedenheit, die beim Betrachten einer Zeichnung freilich nicht vorhanden sein kann. Eine ganz ähnliche Verschiedenheit stellt sich auch, in Folge der Accommodation des Auges für nähere und fernere Punkte heraus, wenn man einen Körper nur mit einem Auge betrachtet. In dieser Beziehung können wir uns allenfalls dem anschliessen, was Brewster*) sagt. „Betrachtet man mit einem Auge einen Körper, z. B. eine sechsseitige Pyramide, deren Spitze dem Auge zugekehrt ist, so werden, wenn sich das Auge dem Scharfsehen der Spitze anpasst, alle entfernteren Punkte nicht scharf gesehen; allein das Auge streift rasch über das Ganze hin, indem es sich dem Scharfsehen der Grundfläche und der Seitenkanten anpasst, und bei diesen aufeinander folgenden Bemühungen, einmal die Pupille und die Augenbrauen zu contrahiren, um nahe Punkte zu sehen, dann sie zu expandiren, um entferntere zu sehen, erhält es eine Kenntniss des gegenseitigen Abstandes der verschiedenen Theile. Betrachtet man nun die Pyramide mit beiden Augen, so wird, wenn man die Entfernung der Spitze oder eines anderen Punktes zu schätzen sucht, die Convergenz der Sehaxen ein sichereres Urtheil darüber gewähren, als das Sehen mit einem Auge.“

365. Hiervon hat man nun auch Anwendung auf das stereoskopische Sehen gemacht; und wir haben die betreffende Theorie bereits näher dargestellt (S. 392 ff.). Reflectiren wir z. B. noch einmal auf die beiden Projectionen eines abgestumpften Kegels, wie man sie mit jedem Auge einzeln sieht, wenn die abgestumpfte Spitze uns zugekehrt ist. Diese Projectionen gewähren, auf bekannte Weise im Stereoskope angebracht, eine einzige Reliefgestalt, die der ganz ähnlich ist, welche der wirkliche Gegenstand darbietet; was sich mit Bezug auf die Sehaxenconvergenz im Wesentlichen folgendermassen erklärt. Liegt der Convergenzpunkt der Sehaxen vor der Ebene beider Zeichnungen, so werden bei einem gewissen Convergenzwinkel die Mittelpunkte der kleinen Kreise

*) Edinb. Transact. for 1843. p. 349.

(beider Projectionen des abgestumpften Kegels) und damit auch diese Kreise selbst zusammenfallen, so dass man nur einen Kreis wahrzunehmen glaubt. Kommen aber beim Fixiren irgend eines Punktes der grossen Kreise diese letzteren zum Decken, so sieht man einen einzigen grossen Kreis. Doch dahin gelangt man nur durch eine Veränderung des Convergenzwinkels beider Sehaxen, und zwar durch eine Verminderung desselben, wenn man von den kleinen zu den grossen Kreisen übergeht. So gewinnt man denn durch ein rasches, continuirliches Schwanken der Sehaxen dieselbe Vorstellung, wie sie aus dem Betrachten des wirklichen Körpers hervorgeht, insofern auch hier die Kenntniss der näheren und entfernteren Punkte desselben durch jene Veränderung der Sehaxenconvergenz gewonnen wird. In dem angegebenen Falle sieht man darum zwei ungleiche Kreise, einen vor dem anderen, und zwar den grösseren, welchem eine geringere Convergenz der Sehaxen entspricht, als den entfernteren, so dass das Ganze den Eindruck eines abgestumpften Kegels macht.

Dass auf solche Weise das stereoskopische Sehen, nämlich die Erscheinung des Relief im Stereoskope zu Stande kommen kann, bezweifeln wir keinen Augenblick. Wir hegen die Ueberzeugung, dass die Veränderungen der Sehaxenconvergenz und Accommodation während des Sehens näherer und entfernterer Punkte, auf die angegebene Weise, zur Auffassung der Tiefendimension körperlicher Objecte führt. Hat jedoch dieser Vorgang eine gewisse Fertigkeit gewonnen und sind bereits zahlreiche feste Associationen zwischen den Empfindungen, die jene Veränderungen begleiten, und den Vorstellungen bestimmter Distanzen entstanden; so erscheint es keineswegs mehr nothwendig, dass die Veränderungen der Accommodation und der Sehaxenconvergenz sich in derselben Weise immer wieder von Neuem vollständig wiederholen, um die Vorstellung der Körperlichkeit eines Objects zu veranlassen. Und bezüglich der stereoskopischen Erscheinungen gibt es gewiss auch noch ein anderes Hilfsmittel, welches das Relief sofort aus den beiden Projectionen hervorgehen lässt. Nach einem Versuche von Dove *) finden die eben genannten Erscheinungen auch bei der Beleuchtung

*) Berichte der Berl. Akad. 1841. S. 252. — Darstellung der Farbenlehre und optische Studien, Berlin 1853. S. 163; — Fortsetzung derselben, Berl. 1859. S. 31.

der Projectionen durch einen elektrischen Funken statt, dessen Lichtdauer nach Wheatstone's Versuchen kürzer als der zehnmillionste Theil einer Secunde ist. Hiernach müssten, bei dieser Beleuchtung, jene Veränderungen in der Convergenz der Sehaxen mit einer Geschwindigkeit erfolgen, die wohl physiologisch nicht annehmbar ist.

366. Wheatstone macht das Erkennen der Tiefendimension durch den Gesichtssinn ohne Weiteres abhängig von dem gleichzeitigen Vorhandensein zweier verschiedenen Netzhautbilder eines körperlichen Objects und schloss demgemäss, dass dieselbe Erscheinung resultiren müsse, wenn anstatt des Objects selbst zwei Zeichnungen (Projectionen) desselben den Augen so dargeboten würden, dass in beiden Fällen die Netzhautbilder sich gleich seien. Man kann dies zum Theil zugeben, falls darin nicht die Behauptung liegen soll, dass die Vorstellung des Körperlichen nur auf diesem Wege gewonnen werde. Sie wird wohl auf solche Weise überhaupt nicht gewonnen; das blosse gleichzeitige Vorhandensein zweier differenter Netzhautbilder macht nicht im mindesten begreiflich, wie daraus die Vorstellung der dritten Dimension hervorgehen soll, man mag die Sache drehen und wenden wie man will; vielmehr wird man, wenn man einen ernstlichen Erklärungsversuch macht, hier noch auf ein anderes wirksames Moment reflectiren müssen. Und dieses Moment ist der sog. Muskelsinn, der zunächst im Verein mit dem Tastsinn die Vorstellung der Tiefendimension anregt. Hierzu gesellen sich dann späterhin die Muskelempfindungen, welche aus den Veränderungen der Accommodation und Sehaxenconvergenz hervorgehen, um mittelst des Gesichtssinnes die Vorstellung der besagten Dimension zu ergänzen. Wir glauben nun, dass die oben erwähnte Meinung Wheatstone's im Wesentlichen als richtig gelten kann, wenn die Vorstellung des Körperlichen, auf die bezeichnete Weise, im Allgemeinen schon gewonnen ist, und dass in diesem Falle häufig schon ein einziger Blick mit beiden selbst ruhig gehaltenen Augen genügt, um einen Körper von einer Fläche zu unterscheiden. Stehen wir in einer gewissen Entfernung vor einem Körper, den wir mit beiden Augen betrachten, so wird bekanntlich, wegen des verschiedenen Standpunktes beider Augen, jedes Auge ein besonderes Netzhautbild erhalten, indem man mit dem einen Auge einen Theil des Körpers sieht, der dem anderen Auge unsichtbar bleibt, und so umgekehrt, während beim Betrachten einer blossen Zeichnung (des Körpers) sich für beide Augen dasselbe darbietet.

Hierin liegt wahrscheinlich ein unwillkührliches Unterscheidungsmittel zwischen der Körper- und Flächenauffassung, sobald nämlich, wie bemerkt, die Vorstellung des Körperlichen schon zur Ausbildung gelangt ist. Das Stereoskop zeigt nun zwei Bilder, wie sie sich auch ohne dasselbe beim Ansehen des betreffenden Körpers mit beiden Augen zeigen, und die Seele schliesst hier wie dort in gleicher Weise auf das Vorhandensein eines Körpers, indem nämlich das Zusammenfallen der beiden Bilder (im Stereoskope) nur als ein Hilfsmittel wirkt, um die Vorstellung des Gegenstandes zu reproduciren. Daher kann denn auch die Vorstellung, die man zum stereoskopischen Sehen mitbringt oder zuvor irgendwie angeregt ist, auf das letztere Einfluss gewinnen.

367. Gelegentlich wollen wir hier noch der pseudoskopischen Erscheinungen gedenken, worunter man die scheinbaren Veränderungen versteht, die Gegenstände in Rücksicht ihrer Grösse und Gestalt unter gewissen Umständen darbieten, wenn die Vorstellung ihrer Entfernung eine Abänderung erfährt. Etliche hierhergehörige Erscheinungen haben wir schon früher (S. 530 ff.) besprochen, und zu ihnen lassen sich noch folgende, von Dove*) hervorgehobene, Erscheinungen rechnen. Bekanntlich zeigt ein Hohlspiegel von einem Gegenstande, der in einer gewissen Entfernung vor ihm steht, ein umgekehrtes Bild, das man, mit beiden Augen betrachtet, vor dem Spiegel erblickt. Schliesst man aber ein Auge, so erscheint das Bild auf der Oberfläche des Spiegels selbst, und zwar vergrössert, da man es unter demselben Gesichtswinkel in grösserer Entfernung wahrzunehmen glaubt. Besonders deutlich wird dies, wenn der vor dem Spiegel befindliche Gegenstand um den Halbmesser des Spiegels entfernt vor dem letzteren steht, also das gleich grosse Bild neben das Object fällt. Noch auffallender ist aber, nach Dove, die Erscheinung, wenn man einen Ring so vor dem Spiegel aufstellt, dass bei binocularer Betrachtung sein vergrössertes Bild mit dem Ringe concentrisch fällt, aber dem Auge näher liegt. „Schliesst man nun das eine Auge, so stülpt sich der vorher gesehene abgekürzte Kegel, dessen Grundfläche das Bild, dessen Schnittfläche der Ring ist, so um, dass man nun auf seine Schnittfläche sieht, während vorher seine Grundfläche dem Auge zugekehrt erschien.“ Dove machte hiervon eine Anwendung auf wirk-

*) Ber. der Berl. Akad. 1851, S. 252.

liche Körper. Derselbe betrachtete die sechsseitige Säule eines Holzmodells von Zinkvitriol mit einem vor das rechte Auge gehaltenen Spiegelprisma, projicirte dieses Bild auf den mit blossem Auge gesehenen Körper, und erhielt dadurch den Eindruck, als wenn die ein convexes Ganze darstellenden Flächen des Körpers sich in einer Ebene befänden. Diese Inversion wird noch gesteigert, d. h. der convexe Körper wird concav, wenn man auch vor das andere Auge ein Spiegelprisma hält, oder den Körper mit dem von Dove beschriebenen Prismenstereoskop betrachtet.

In ähnlicher Weise aber wie das Bild des Hohlspiegels verhält sich das virtuelle Bild eines Planspiegels, das nach einem bekannten Satze so weit hinter dem Spiegel erscheinen muss als der betreffende Gegenstand vor ihm liegt. Wenn man nun aber sein eigenes Bild mit beiden Augen betrachtet und in der bezeichneten Entfernung hinter dem Spiegel erblickt, so kann es, wenn man ein Auge schliesst, geschehen, dass der Spiegel von uns zurücktritt, dergestalt, dass sein Rand das eigene Bild umschliesst (s. S. 533 ff.). So geschah es bei Dove*), der einen kreisförmigen ebenen Spiegel von 4½ Zoll Durchmesser in der Art gegen einen hellen Grund hielt, dass er sein Bild binocular deutlich hinter demselben erblickte. Als er nun das eine Auge schloss, sah er nach einiger Zeit den Spiegel so weit zurücktreten, dass der Rand desselben sein Bild als Rahmen umfasste.

368. Die oben erwähnten Umkehrungen erhabener Reliefe in vertiefte und vertiefter in erhabene (mittelst eines Spiegelprisma) wurden von Wheatstone**) genauer untersucht und von ihm pseudoskopische Erscheinungen genannt. Neuerdings hat nun Dove***) die sämmtlichen hierhergehörigen Erscheinungen, die theils mit blossem, theils mit bewaffnetem Auge wahrgenommen werden, übersichtlich geordnet und sie unter zwei Hauptabtheilungen gebracht, von denen die eine sich als monoculare, die andere als binoculare Pseudoskopie bezeichnen lässt.

Zur monocularen Pseudoskopie mit blossem Auge kann man die in §. 357 besprochene Erscheinung zählen. Die hierher gehörigen Gestaltveränderungen zerfallen aber nach Dove in zwei Klas-

*) Farbenlehre u. optische Studien, Fortsetzung derselben, Berl. 1859. S. 20.
**) Philos. Transact. 1852.
***) Poggend. Ann. Bd. CI. S. 302. — Optische Studien, Fortsetzg. S. 14

sen; es sind entweder Verzerrungen sonst richtig erscheinender Objecte oder Wahrnehmungen richtiger aus veränderten Darstellungen derselben. Zu der letzteren Klasse gehören, wie Dove bemerkt, streng genommen alle perspectivischen Zeichnungen, die beim Betrachten mit einem Auge so sehr an Wahrheit gewinnen, was man am deutlichsten an den Visirbrettern bemerkt, bei welchen die Gestalt eines senkrechten Gegenstandes im Verhältniss des Schattens bei schiefer Beleuchtung auf horizontalem Boden dargestellt ist.

369. Zur monocularen Pseudoskopie mit bewaffnetem Auge gehört die bekannte Gesichtstäuschung, bei welcher uns Vertiefungen als Erhöhungen und Erhöhungen als Vertiefungen erscheinen, so dass Cameen in Intaglio's, Intaglio's dagegen in Cameen verwandelt werden. Leicht nimmt man diese Täuschung wahr, wenn man ein Petschaft durch das Ocular eines Fernrohres, oder durch ein zusammengesetztes Mikroskop oder durch irgend eine Verbindung von Linsen, welche die durch dieselben gesehenen Gegenstände umkehrt, betrachtet. Dann erscheint das Vertiefte des Petschafts als Erhabenheit, wie der davon in Siegellack gemachte Abdruck. — Mit der Erklärung dieser Erscheinung, die nach der gewöhnlichen Angabe zuerst in einer der früheren Sitzungen der Königl. Societät in London beobachtet sein soll und über welche dann auch Gmelin eine Reihe von Wahrnehmungen bekannt machte*), hat sich wohl zunächst Brewster**) genauer befasst. Derselbe reflectirt dabei vorzugsweise auf die Erfahrung, die Jeder ganz unwillkürlich unzählige Mal macht, dass nämlich der Schatten eines vertieften Körpers stets auf der Seite zunächst dem Lichte, der einer Hervorragung auf der dem Lichte entgegengesetzten Seite liegt. Wird nun mittelst einer oder mehrerer Linsen das Siegel des Petschaftes umgekehrt, so wird die beschattete Seite von dem Orte, wo das Licht herkommt, am weitesten entfernt sein, und daher die Vertiefung des Petschafts convex oder hervorragend erscheinen. Bei diesem Versuche kennen wir die wahre Richtung des Lichtes, welches auf das Siegel fällt, mag nun die Beleuchtung von dem durch ein Fenster des Zimmers einfallendem Lichte oder von einer Kerzenflamme herrühren. Diese Richtung bleibt unverändert, wäh-

*) Philos. Transact. 1745.

**) s. On the conversion of relief by inverted vision, Edinb. Transact. 1844.

rend das Petschaft umgekehrt und hinsichtlich seiner Licht und Schatten so vertheilt werden, wie es bei einem Relief der Fall ist. Würde die Stellung des Fensters oder der Lichtflamme in Bezug auf das Petschaft, eben so wie dieses umgekehrt, so könnte die Täuschung nicht hervortreten. Benutzt man ein kleines Fernrohr zum Umkehren des Bildes auf dem Petschaft und bedeckt man die als Lichtquelle dienende Kerze bis auf die Flamme ganz, während man überdies Sorge getragen, dass das Licht zugleich mit dem Bilde umgekehrt wird; so erscheint das Siegel fortwährend vertieft, indem der Schatten sich mit dem erleuchteten Theile auf derselben Seite befindet. Dieselben Erscheinungen bemerkt man, wenn man denselben Versuch mit dem erhabenen Abdrucke des Petschafts in Siegellack wiederholt. Der Abdruck erscheint vertieft, wenn er allein umgekehrt wird, dagegen fortwährend erhaben, wenn zugleich auch das Licht eine Umkehrung erfährt. — Die Täuschung hängt, nach Brewster, ab von der Genauigkeit und Ausdehnung unserer Kenntnisse, welche wir von Licht und Schatten haben, und während einige Personen unter ihrem Einflusse stehen, sind andere davon gänzlich unabhängig. Ist das Siegel oder sind die vertieften Züge nicht polirt, sondern matt, und ist die Fläche ringsumher von gleichförmiger Farbe und Glätte, so wird fast jede Person dieser Täuschung unterworfen sein, da eben Allen bekannt ist, dass der Schatten eines vertieften Körpers stets auf der Seite zunächst dem Lichte, der einer Hervorragung aber auf der dem Lichte entgegengesetzten Seite liegt. Wenn jedoch der Gegenstand der erhabene Abdruck eines Petschaftes in Siegellack war, fand Brewster, dass derselbe, als er umgekehrt wurde, stets den drei jüngsten von sechs Personen, die sich in einer Gesellschaft befanden, erhaben erschien, während die drei ältesten der Täuschung unterworfen waren. Indessen kann ein scharfer Beobachter in manchen Fällen der Täuschung entgehen, wenn alle anderen derselben hingegeben sind. Brewster nimmt beispielsweise an, dass etwas Staub oder ein kleines Theilchen Siegellack an der Oberfläche des Petschafts klebe, wodurch ein Schatten bewirkt werden kann. Dies wird ein gewöhnlicher Beobachter unbeachtet lassen, oder doch, wenn ihm dieser Umstand nicht entgeht, weiter keine Folgen daraus ziehen; ihm wird daher der vertiefte Kopf des Petschafts als Camee erscheinen. Der aufmerksame Beobachter hingegen, welcher die kleine Erhöhung wahrnimmt und bemerkt, dass der Schatten

derselben linker Hand hin fällt, wird sofort schliessen, dass das Licht von dieser Seite kommt, und wird das Siegel vertieft sehen, indem jetzt der Schatten mit dem Lichte auf derselben Seite ist.

370. Man hat gegen diese Erklärung Brewster's den Einwand erhoben, dass die in Rede stehende Täuschung auch noch bei gleichmässiger Beleuchtung aller Theile des betreffenden Gegenstandes eintreten könne, wie auch dann, wenn man den letzteren durch eine offene Röhre und ohne umkehrende Linse betrachte. Gleichwohl dürfte anzuerkennen sein, dass der von Brewster geltend gemachte Umstand, nämlich die besondere Licht- und Schattenvertheilung, bei dieser Art von Gesichtstäuschung wirksam sein kann und in vielen Fällen wohl auch von Einfluss ist. Daneben ist es möglich oder vielmehr sehr wahrscheinlich, dass hier noch andere Factoren eingreifen; und unter ihnen mag vielleicht auch einer sein, der die Erscheinung unter gewissen Umständen schon allein, ohne Beihilfe jenes Umstandes, veranlasst.

Nach Drobisch*) sind zur Hervorbringung der bezeichneten Erscheinung wahrscheinlich zweierlei Bedingungen erforderlich, eine physische und eine psychische. Jene soll bestehen in der Accommodation des Auges für eine gewisse Entfernung, diese in der Auffassung des Objects in Beziehung auf die Beleuchtung und als eines Totalbildes. In Hinsicht auf das erstere erinnert Drobisch, dass, so lange man die Vertiefung als Vertiefung betrachte, alle Einzelheiten viel greller hervortreten; es sei ungefähr so, als ob man ganz in der Nähe einer Decorationsmalerei stehe und die groben einzelnen Striche mit grösster Deutlichkeit sehe, ohne einen Totaleindruck zu erlangen. Dazu bedürfe es eines entfernteren Standpunktes, wo die Einzelheiten undeutlicher werden und miteinander zu einem Ganzen verschmelzen. So verschmolzen stellten sich auch in dem erhabenen Bilde des Vertieften die Einzelheiten dar, ohne dass doch deshalb das Bild ein undeutliches sei, welches vielmehr wegen des plastischen Heraustretens aus der ebenen Fläche Staunen errege. Nun ändere sich hier zwar die Entfernung nicht, aber die Accommodation des Auges müsse während dieser Täuschung auf eine andere Entfernung berechnet sein als die, in welcher sich das Object wirklich befindet, gewiss auf eine Entfernung, die um die Grösse der Vertiefung kleiner sei als die Entfernung der Ebene

*) Empirische Psychologie, 1842. S. 118 f.

des Petschafts, denn das Auge habe sich ganz so eingerichtet, als ob es ein Relief zum Ziel seines Sehens hätte, das sich eben so viel über jene Ebene erhöbe, als jetzt die Vertiefung unter derselben liege. Hierdurch komme nun in die Bilder der einzelnen Einschnitte gerade so viel Undeutlichkeit, als nöthig, um sie zur Verschmelzung miteinander zu einem Ganzen tauglich zu machen. Die Veranlassung des Auges zu dieser Accommodation scheint aber Drobisch eine psychische Wirkung zu sein. Die Täuschung lasse sich am leichtesten durch die umkehrende Ocularröhre eines Fernrohres hervorbringen, weil dann die Beleuchtung genau die eines Reliefs sei: „Lässt man z. B. das Licht von der linken Seite auf das Petschaft fallen, so sind auf diesem selbst alle Einschnitte links schattig und rechts beleuchtet. Die Ocularröhre kehrt aber Links und Rechts um, und Licht und Schatten sind nun so vertheilt, wie sie — das Licht immer noch von der Linken herkommend gedacht — bei einem Relief vertheilt sein müssten.“ In dieser Beziehung macht also Drobisch das oben ausgesprochene Erklärungsprincip Brewster's geltend. Bei der Betrachtung mit der einfachen Linse oder gar mit dem blossen Auge findet jene Umkehrung (von Links und Rechts) nicht statt; dann ist aber auch die Täuschung etwas schwieriger, und wenn sie endlich gelungen ist, sagt Drobisch, wird man bemerken, dass man sich einbildet, d. h. durch blosses Vorstellen hinzubringt, das Licht komme von der entgegengesetzten (rechten) Seite. „Es muss hier erst eine Auffassung zu Stande kommen, der sich die Wahrnehmung zum Theil widersetzt: denn die Umgebungen zeigen sich alle von der linken Seite her beleuchtet; man muss sich daher erst ganz in den Anblick des Petschafts vertieft, alles Umgebende vergessen haben, mit der ganzen Aufmerksamkeit auf jenem ruhen, wenn jene Auffassung zu Stande kommen soll.“

Es ist bei dieser Art von Täuschungen ein bekannter Umstand, dass Vertiefungen viel leichter in Erhabenheiten als diese in jene sich umkehren, was auch beim Betrachten mit dem blossen Auge gilt. Drobisch führt dies wohl ganz richtig auf die Gewohnheit zurück, d. h. auf festgewordene Associationen, nach welchen uns das Vertiefte als Bild dessen, was in der Natur erhaben, im Allgemeinen etwas Unverständliches ist.

371. Verwandt der zuvor besprochenen Täuschung, die also nicht ausschliesslich zur monocularen Pseudoskopie mit bewaffnetem

Auge gerechnet werden kann, ist eine Illusion, von welcher Brewster*) sagt, dass sie durch eine fortgesetzte Anstrengung des Geistes, sich selbst zu täuschen, hervorgebracht werde. Richtet man das Auge fest auf eine Gypsform, — wie sie zur Darstellung von Basreliefs benutzt wird, — ohne dabei von den umstehenden Gegenständen Notiz zu nehmen, so versetzt man sich in den Glauben, dass das Eingravirte ein Basrelief sei. Nach gehöriger Uebung gelang es Brewster, mit dem Auge allein eine ganze hohle Maske eines menschlichen Antlitzes in einen projicirten Kopf zu verwandeln. Um dies zu erreichen, muss man den Anblick aller anderen Gegenstände ausschliessen, namentlich den des Randes und der Dicke des Gusses.

Diese Illusion hat neuerdings auch H. Schröder**) zum Gegenstande einer genaueren Betrachtung gemacht. Derselbe bemerkt: „Wenn man die Matrize eines Kopfes, sei es in Gyps, Schwefel, Wachs oder in einem Stein in gehöriger Entfernung betrachtet, und sich in ihren Anblick einige Zeit versenkt, so geht die Matrize in eine Patrize über. Es gelingt dies leichter bei schiefer Beleuchtung und bei einseitig auffallendem Lichte, als bei allgemeiner Tageshelle. Die Matrize muss von Anfang an in einer solchen Entfernung vom Auge ausserhalb der deutlichsten Sehweite befindlich sein, dass das Auge zwar wohl die Schatten- und Lichtverhältnisse erkennt, aber doch nicht die Umrisse aller einzelnen Theile mit voller Schärfe auffasst. So lange eine Matrize in solcher Nähe vor dem Auge ist, in welcher alle ihre Theile vom Auge genau erkannt werden, erscheint sie als Matrize, wie lange sie auch betrachtet werden mag. Daher müssen grössere Formen, welche stärkere Vertiefungen enthalten, weiter vom Auge entfernt werden, als kleinere; und da man mit beiden Augen das Relief schärfer wahrnimmt als mit Einem Auge, so muss eine Matrize weiter entfernt werden, wenn sie beim Gebrauche beider Augen erhaben erscheinen soll, als bei Betrachtung derselben mit Einem Auge. Die Täuschung stimmt in dieser Beziehung ganz mit derjenigen bei Zeichnungen und Gemälden überein. Man kann keinen körperlichen Gegenstand innerhalb der deutlichen Sehweite täuschend zeichnen oder malen, u. s. w. Das Erhabensehen hohler Formen mit freiem Auge tritt nur ein, wenn dieselben Köpfe, menschliche

*) Edinb. Journ. of Science. Vol. IV. 1826.

**) Poggend. Ann. Bd. LXXXVII. S. 306.

Figuren, überhaupt solche Gegenstände vorstellen, welche nur plastisch gedacht werden können.... Die Matrize eines menschlichen Antlitzes weckt die Vorstellung von einem menschlichen Antlitz in plastischer Form aus dem gleichen Grunde, aus welchem eine Zeichnung oder ein Gemälde diese Vorstellung hervorruft, nur thut es die Matrize viel vollkommener, weil sie nicht blos ein mattes Bild von Schatten und Licht, sondern den wirklichen Schatten und das wirkliche Licht selbst enthält."

Auch nach Schröder ist es hier die Vertheilung von Schatten und Licht, welche die Vorstellung der plastischen Form des betreffenden Gegenstandes veranlasst. Derselbe hebt hervor, dass, wenn eine Matrize dem freien Auge erhaben erscheine, die Vorstellung unerlässlich sei, dass das Licht aus einer anderen Richtung herkomme, als woher es wirklich kommt. Diese Vorstellung habe aber keine Schwierigkeit; eine hohle Form z. B. einer menschlichen Figur in Gyps erscheine dem freien Auge sogar um so vollkommener und um so leichter erhaben, je näher dieselbe in etwas schiefer Richtung dicht neben das helle Licht einer Lampe gehalten werde, weil sich dann Schatten und Licht am schärfsten ausprägten. Der Anblick der Flamme selbst, neben der beleuchteten Figur, störe oder erschwere durchaus nicht die Annahme, welche der Vorstellung unwillkürlich und unbewusst zu Grunde liege, dass die Beleuchtung aus einer anderen Richtung komme, als in welcher sich das Licht wirklich befindet. Wie bei der Auffassung einer Zeichnung oder eines Gemäldes, so komme es auch bei der einer Form lediglich auf die Beschaffenheit von Licht und Schatten in dem Gegenstande selbst an; das Bewusstsein, von welcher Seite das Licht wirklich herkomme, wirke dabei gar nicht ein.

Zwei Seelenthätigkeiten sind es, nach Schröder, welche sich bei der in Rede stehenden Illusion entgegenstehen. Die Wahrnehmung der wirklichen Contouren der Theile des Objects erzeugt die Vorstellung der Matrize; die Wahrnehmung der Vertheilung von Licht und Schatten sucht viel mächtiger als ein Gemälde es kann, die Vorstellung der plastischen Form des abgebildeten Gegenstandes, die Vorstellung der Patrize zu erwecken, die einmal entstanden sich nicht leicht verdrängen lässt, so dass die Matrize, als solche, erst dann wieder erscheint, wenn man eine Zeitlang weggesehen hat.

Als einen bei dieser Inversion bisher gar nicht beachteten

Umstand bezeichnet Schröder die gewissermassen verklärte Beleuchtung, in welcher eine hohle Form, etwa eines Kopfes oder einer menschlichen Figur, erscheine, wenn sie mit freiem Auge erhaben gesehen werde. Diese Erscheinung soll namentlich bei scharfer einseitiger und etwas schiefer Beleuchtung einer zarten und guten Gypsform sehr brillant werden. Schröder*) leitet dieselbe aus der Art und Weise ab, wie wir uns die Beleuchtung des Körpers auf Grund der vorhandenen Licht- und Schattenvertheilung vorstellen. Man sehe den opaken Körper so beleuchtet, als ob das Licht von Innen käme, in einer Art Phosphorescenz oder Selbstleuchten, welche ganz die Schatten- und Lichtverhältnisse einhalte, wie sie von geradlinig einfallendem fremdem Lichte herzurühren pflegen.

372. Zur binocularen Pseudoskopie mit blossen Augen rechnet Dove unter anderem die scheinbare Bewegung, welche die durch einen Hohlspiegel oder eine Linse auf einen durchscheinenden Vorhang projicirten Bilder unter Umständen darbieten. So scheint ein solches Bild, wenn es durch Entfernung vom Spiegel vergrössert wird, sich uns zu nähern; und wenn sich bei chromatoskopischen Darstellungen Kreise auseinander entwickeln, glaubt man plötzlich in einen erleuchteten Tunnel hineinzufahren, und zurückzufahren, wenn sie sich zusammenziehen. Eben hierher gehört nach Dove eine auf die Grösse bezügliche Veränderung, die man wahrnimmt, wenn wir mit grosser Geschwindigkeit uns bewegend zuerst mit uns bewegte, dann ruhende Gegenstände betrachten, oder zuerst bewegte und dann gegen uns in relativer Ruhe befindliche. So erscheinen beim ersten Fahren auf der Eisenbahn alle Gegenstände, bei denen man vorbeikommt, ungewöhnlich klein. Die umgekehrte Täuschung beobachtete Dove**), als er lange die vorüberfliegenden Wände eines Durchschnitts auf der Eisenbahn betrachtet hatte und dann in den grossen (nicht in Coupés eingetheilten) Wagen zurückblickte, der nun den Eindruck eines hohen, mit gewölbtem Dache versehenen Saales machte.

Zur binocularen Pseudoskopie mit bewaffneten Augen können wir endlich mit Dove alle stereoskopischen Darstellungen rechnen, die sich wie alle pseudoskopischen Erscheinungen erst allmälig, aber dann auch sehr energisch entwickeln.

---

*) a. a. O. S. 311.

**) Darst. der Farbenl. u. optische Studien, S. 286 f.; Forts. d. optischen Stud., S. 17.

378. Betrachten wir von einem bestimmten Standpunkte aus die in unserem Sehfelde gelegenen Gegenstände, so erscheinen sie uns alle im Zustande der Ruhe, wenn keiner derselben seine Lage zu den andern verändert. Das Auge findet dann sowohl ruhend als auch bewegt stets dieselben räumlichen Verhältnisse vor. Verändert aber ein Gegenstand auf stetige Weise seinen Ort, so verändert sich auch fortwährend die Zusammenfassung dieses Gegenstandes mit seiner unverrückt gebliebenen Umgebung, und derselbe erscheint insofern als ein bewegter; denn er ist es, welcher während der Verschiebung seines Bildes auf der Netzhaut die räumliche Zusammenfassung seiner selbst mit der Umgebung beständig in uns abändert und uns wohl auch in dem Falle, wo er einen besonderen Reiz ausübt, veranlasst, seiner Bewegung durch Drehung des Auges, Kopfes und selbst des übrigen Körpers zu folgen. Dieser Bewegung unseres eigenen Körpers entsprechen nun bestimmte Muskelempfindungen, die hier in unserem Bewusstsein als etwas Secundäres, durch die abgeänderte räumliche Zusammenfassung Veranlasstes, auftreten. Bewegen sich aber mehrere Gegenstände zugleich in unserem Gesichtsfelde, so misslingt für sie alle eine constante räumliche Zusammenfassung und sie erscheinen uns dann alle bewegt.

Gehen wir selbst zwischen verschiedenen Gegenständen hindurch, so verändert sich zwar unsere relative Stellung zu denselben, und einige seitlich gelegene verschwinden auch ganz, während andere deutlicher in unseren Gesichtskreis treten; allein die räumlichen Verhältnisse der vor uns liegenden Objecte bleiben doch im Wesentlichen dieselben, während wir uns unserer eigenen Ortsveränderung durch die im Acte des Gehens veranlassten Muskelempfindungen bewusst werden; daher wir denn auch bald die wahrgenommene Veränderung in der relativen Lage der Gesichtsobjecte auf unsere eigene Bewegung beziehen und sie selbst, die Objecte, für ruhend halten. Nur wenn wir rasch vorwärts laufen, geschieht es, dass wir bezüglich der seitwärts gelegenen Gegenstände einer Täuschung ausgesetzt werden, die noch auffälliger beim raschen Fahren hervortritt, weil sich hier die Ortsveränderung, die wir selbst erleiden, in Ermangelung eigener Anstrengung viel weniger bemerklich macht. In diesem Falle entsteht bekanntlich der leicht begreifliche Schein, als ob jene Gegenstände in entgegengesetzter Richtung gegen den Hintergrund an uns vorübereilten. Eben hier-

her gehört auch die bekannte scheinbare Bewegung der Gestirne in der Richtung von Ost nach West, lediglich eine Folge der entgegengesetzten wirklichen Bewegung der Erde von West nach Ost, einer Bewegung, der wir uns durch keinerlei Gefühle bewusst werden.

In nahem Zusammenhange mit der vorerwähnten Täuschung steht eine andere, der man auf Eisenbahnstationen nicht selten ausgesetzt ist. Hält nämlich der Zug, worin man sitzt, an, während ein anderer in entgegensetzter Richtung an uns vorüberfährt, so kann es in Ermangelung fester Vergleichungspunkte leicht den Anschein gewinnen, als ob der zur Ruhe gekommene Zug noch in Bewegung sei. Man ist dann von dem Gedanken der Vorwärtsbewegung noch afficirt, indem der benachbarte Zug an uns vorübereilt, und die Umstände sind für uns im Wesentlichen ganz dieselben wie da, wo wir in einem bewegten Zuge an ruhenden Gegenständen rasch vorübergleiten, welche letzteren dann in entgegengesetzter Richtung an uns vorüberzufliegen scheinen.

Werden wir ohne eigene Muskelanstrengung, wie sie unsere selbstständige Ortsveränderung im Raume verlangt, mit einer gewissen Geschwindigkeit von einem vor uns liegenden Gegenstande entfernt, so scheint dieser in entgegengesetzter Richtung von uns hinwegzurücken. Ein Beispiel hierzu bietet die bei Luftschifffahrten gemachte Erfahrung, nach welcher die Erde bei vertikaler Aufsteigung des Ballons unter ihm weg zu sinken scheint. Umgekehrt scheint uns ein Gegenstand entgegenzukommen, wenn wir uns demselben unter den angeführten Bedingungen nähern.

374. Durch die gewöhnlichen Augenbewegungen, welche wir beim normalen Sehen ruhender Objecte vollziehen, entsteht keine Scheinbewegung der letzteren. Dagegen tritt eine solche ein, wenn das Auge ohne willkürliche Muskelzusammenziehung auf ungewöhnliche Weise bewegt wird, und auch dann, wenn es in ungewohnter Weise zu unwillkürlichen Muskelzusammenziehungen und entsprechenden Bewegungen genöthigt wird. Zu diesen Fällen gehört die Bewegung eines Gesichtsobjects, welche entsteht, wenn man auf dasselbe ein Auge richtet und dieses mittelst eines Fingerdruckes, etwa von unten nach oben, verschiebt. Und eben dahin scheint auch jene tanzende Bewegung der Gesichtsobjecte zu gehören, welche bei raschem Schütteln des Ko-

pfes erfolgt. Namentlich ist aber hierher die Scheinbewegung zu rechnen, die wir beim Gesichtsschwindel nach einer drehenden Bewegung des eigenen Körpers wahrnehmen. Dreht sich der Körper in bestimmter Richtung um eine Axe, so folgt das Auge dieser Drehbewegung, um so mehr und gewisser, je schneller sie ist und je länger sie dauert. Da nun diese drehende Bewegung des Auges auch nach der Drehung des Körpers noch eine Zeitlang unwillkürlich fortdauert, indem es sich immer von Neuem der Seite zuwendet, nach welcher die Drehung geschah, so veranlasst dieselbe den Schein, als ob eine Bewegung der Gesichtsobjecte in entgegengesetzter Richtung stattfände. Nur wenn man während dieses Schwindels ein bestimmtes Object scharf fixirt, werden dadurch jene Muskelbewegungen des Auges zum Stillstande gebracht, so dass dann auch die Scheinbewegung der Umgebung aufhört; doch tritt dieselbe sogleich wieder ein, wenn man im Fixiren nachlässt.

Die scheinbare Drehung der Umgebung geschieht hier, wie bereits bemerkt, stets in einer der Drehung des Körpers entgegengesetzten Richtung, gewöhnlich in derselben Ebene, in welcher die Bilder der umgebenden Objecte über die Netzhaut gingen. Neigt man den Kopf, nach der Drehung des Körpers, rasch nach der einen oder anderen Seite, so bemerkt man, dass die Scheinbewegung schief auf- oder abwärts geht, nämlich drehend um dieselbe Axe des Kopfes, wie zuvor. Purkinje *), der eine Reihe genauer Versuche bezüglich der Richtung anstellte, in welcher bei verschiedenen Kopfstellungen während und nach der Drehung des Körpers die Bewegung der Gegenstände zu erfolgen scheint, gibt die Regel: dass die Scheinbewegung der Objecte bei jeder späteren Lage des Kopfes stets um die Axe des Kopfdurchschnittes erfolgt, um welche die Drehung des Körpers geschah, und zwar in einer zur letzteren entgegengesetzten Richtung.

375. Man erkennt nun leicht, dass eine Scheinbewegung der Objecte unter gewissen Umständen auch dann entstehen kann und muss, wenn das Auge eine Zeitlang irgendwie von den gewöhnlichen abweichende Bewegungen vollzogen hat. Sind wir zum

---

*) Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Berlin 1825. — S. auch Lotze, medic. Psychologie, S. 443 ff.

Beispiel*) einige Zeit auf der See gefahren, so glaubt man nachher am Lande ähnliche Bewegungen des Zimmers zu sehen, wie sie in der Cajüte des Schiffes stattfanden. Auf dem Schiffe wurden wir nämlich beim Betrachten der daselbst befindlichen Gegenstände zu Augenbewegungen genöthigt, die von den gewöhnlichen merklich abweichen. Kommen wir nun wieder auf das feste Land, so werden wir die im Schiffe eingeübten Augenbewegungen auch beim Fixiren der auf dem Lande befindlichen, ruhenden Objecte anwenden. Dies führt aber nothwendig, weil sich diese Objecte nicht wie die im Schiffe mit dem Auge in entsprechender Weise bewegen, zu einer Verschiebung ihrer Bilder auf der Netzhaut und daher zu einer Scheinbewegung derselben Objecte, was so lange dauert, bis sich das Auge wieder auf die Fixation feststehender Objecte eingeübt hat.

Und so ist denn auch ferner zu erwarten, dass alle ungeordneten Augenbewegungen in Folge zahlreicher ungewöhnlicher Muskelzusammenziehungen, durch welche Ursachen sie auch veranlasst sein mögen, zu einer gewissen Scheinbewegung der Objecte führen muss, wie dies bei Fieberkranken wohl vorkommt.

Bekanntlich stellt sich bei sehr vielen eine Art von Gesichtsschwindel schon dann ein, wenn sie in einen tiefen Abgrund oder von einem hohen Thurme hinabsehen, oder wohl auch, wenn sie zu einem solchen hinaufblicken. Dieser Schwindel**) mag wohl, wie man vermuthet, daher kommen, dass das Auge in Ermangelung des gewohnten nahen und festen Bodens beim Hinabsehen in die Tiefe vergebens nach einem festen Haltpunkte suchend ein Gefühl der Unsicherheit in der Stellung des eigenen Körpers herbeiführt, welches noch durch den Gedanken des Hinabfallens verstärkt wird.

376. Zum Schlusse noch die Bemerkung, dass die wirkliche Bewegung der äusseren Objecte in das Vorstellen der räumlichen Verhältnisse eine grössere Mannigfaltigkeit bringt, indem sie unsere Umgebung in eine Mehrheit isolirter Objecte auflöst. Anfänglich wird dem Kinde Vieles in einem festen Zusammenhange erscheinen, der allmälig durch die Ortsveränderung der einzel-

*) s. Helmholtz, über das Sehen des Menschen. Ein populär wissenschaftlicher Vortrag. S. 27 f.

**) s. Lotze, Medic. Psychologie S. 445.

nen Objecte zerrissen wird. Was nun während und nach der Ortsveränderung in seinen Theilen unverändert beisammen bleibt, gilt auch im Vorstellen als Ein Object, das, je öfter es seine Umgebung wechselt, desto mehr die Beziehung auf eine bestimmte Umgebung verliert, so dass es zuletzt als ein selbstständiges (isolirtes) Object nur überhaupt noch in einem gewissen (leeren) Umgebungsraume vorgestellt wird. So entsteht in unserem Vorstellen ein grosser Reichthum von einzelnen Objecten, der noch dadurch vermehrt wird, dass verschiedene Körper sich nicht allein der Bewegung, sondern auch einer Zertheilung in kleinere Theile unterworfen zeigen.

Zweites Kapitel.

Die Theorie des Sehens und räumlichen Vorstellens vom Standpunkte der rationalen Psychologie.

377. Aetherwellen, die von äusseren Objecten ausgehen und durch Brechung in den optischen Medien des Auges Bilder auf seiner Netzhaut darstellen, sind das Erregende der Opticusfasern, welche den empfangenen Reiz nach dem Gehirn leiten, damit er hier die eigentliche Lichtempfindung auslöse.

Wenngleich es nun sehr wohl möglich und sogar wahrscheinlich ist, dass gewisse Nervenelemente der Retina durch die einfallenden Aetherwellen gleichfalls zu einer schwingenden Bewegung gebracht werden, die sich vielleicht auch noch durch die Opticusfasern bis zum Centralorgan fortpflanzt; so sind doch Bewegungszustände des Sehnerven und irgend welcher Centralorgane noch keine Empfindungen, sondern höchstens nur Veranlassungen dazu. Räumliche Bewegungszustände irgend welcher Art sind als solche völlig unvergleichbar den Empfindungen, deren wir uns bewusst sind oder bewusst werden können. Auch wird wohl ohne Zweifel die oscillatorische Bewegung der Sehnervenelemente, wenn sie ja stattfindet, noch einen gewissen, den Molecülen immanenten inneren Reizzustand zur Folge haben, der sich durch die Fortpflanzung ener Bewegung von einem Molecül zum anderen selbst fortpflanzt

oder der in Folge der fortschreitenden Schwingungsbewegung in jedem Molecül von Neuem erzeugt wird.

In der Absicht, auf die Erzeugung der Sinnesempfindungen gegen das Ende dieses Kapitels wieder zurückzukommen, wollen wir zunächst nur an der Thatsache festhalten, dass durch Einwirkung der Aetherwellen auf die Netzhautmolecüle gewisse Reizzustände entstehen, die von den Opticusfasern zu dem betreffenden Centralorgan geleitet hier in der Form von Lichtempfindungen percipirt werden.

378. Denken wir uns also, dass in Folge eines bestimmten Retinabildes eine gewisse Anzahl von Opticusfasern gereizt sei. Dann wird das Centralorgan mindestens gegen eben so viele Reize zu reagiren oder dieselben zu percipiren haben. Sind nun aber die diesen Reizen entsprechenden Lichtempfindungen räumlich getrennt, wie es der Fall sein würde, wenn wir annehmen wollten, dass die centralen Enden der gereizten Opticusfasern Träger derselben seien; so kann aus dem Complex der gegebenen Lichtempfindungen sicher nicht die Vorstellung eines continuirlichen Nebeneinander, also einer Fläche entstehen, wie es doch mit den Lichtempfindungen geschieht, die durch die Aetherwellen einer äusseren Fläche in uns erregt werden. Eben so wenig wird aber der bezeichnete Complex sofort die Vorstellung eines continuirlichen Nebeneinander gewähren, wenn die Reizzustände der Sehnervenfasern in die räumlich getrennten Molecüle eines Centralorgans übergehen und hier etwa als Lichtempfindungen auftreten. In jedem Molecül wird dann die ihm inwohnende Lichtempfindung für sich bestehen, unberührt von den Lichtempfindungen aller anderen Molecüle. Alle diese anderen Lichtempfindungen sind nicht seine Zustände, und die einzelnen Empfindungen aller einzelnen Molecüle können nicht zusammen die Vorstellung eines continuirlichen Nebeneinander ergeben, da eine solche Vorstellung eben die streng einheitliche Zusammenfassung sämmtlicher Empfindungen erfordert. Jedes Molecül ist mit seinen inneren Zuständen ein Einzelwesen, das nichts weiss von den inneren Zuständen der übrigen Molecüle, die mit ihm in demselben Centralorgane befindlich sind.

Nun könnte man wohl annehmen, dass die verschiedenen Molecüle des Centralorgans ihre inneren Zustände einander gegenseitig mittheilten. Dann würde allerdings jedes einzelne Molecül zu einem Träger sämmtlicher gegebenen Reizzustände, und die Vor-

stellung des continuirlich Nebeneinander bei einer Mehrheit gleichzeitiger Lichtempfindungen würde so viel Mal vorhanden sein, als derartige Molecüle im Centralorgan vorkommen. Ist aber jedes einzelne Molecül, wie man physikalisch annehmen muss, ein Aggregat selbstständiger, miteinander in Wechselwirkung stehender Elemente (Atome), so bezieht sich die Mittheilung jener inneren Reizzustände (resp. Lichtempfindungen) auf diese Atome, von denen nun entweder jedes gleich den übrigen oder nur eins, das etwa als Centralelement des Molecüls dient, zum Träger des ganzen Complexes von Lichtempfindungen wird. Im ersten Falle hätten wir dann so viele selbstständige Träger sämmtlicher Lichtempfindungen als die Anzahl der Atome beträgt, welche die betreffenden Molecüle constituiren, und im zweiten so viele als es Molecüle gibt, die von den Reizzuständen der Opticusfasern in gleicher Weise afficirt werden. Eine solche Annahme möchte jedoch als ein sehr unnöthiger Luxus erscheinen, der überdies noch die vollkommenste Harmonie zwischen den einzelnen Trägern in Rücksicht ihrer inneren Zustände erfordert, wenn es nicht schon im gewöhnlichsten Vorstellen eines und desselben Menschen zu einer Confusion kommen soll, von der wir erfahrungsmässig nichts wissen.

379. Wie die Lichtempfindungen, so erfordern auch die übrigen Sinnesempfindungen einen bestimmten Träger; aber man kann nicht annehmen, dass für jede Klasse von Sinnesempfindungen ein besonderer Träger existire. Vielmehr sind wir wegen der Einheit unseres Bewusstseins, die sich auch in der innigen Wechselwirkung aller Seelenzustände ausspricht, zu der Annahme eines einzigen Trägers für dieselben genöthigt. Alle unsere Empfindungen und Vorstellungen können sich auf mannigfache Weise associiren und compliciren, bald sich gegenseitig im Bewusstsein emporheben, bald sich gegenseitig hemmen, was alles nicht geschehen könnte, wenn sie klassenweise in besonderen Trägern vertheilt wären; oder man müsste auch hier annehmen, dass die verschiedenen Träger ihre inneren Zustände sich gegenseitig vollständig mittheilten. Allein damit würde man eingestehen, dass die Thatsachen des Bewusstseins einen einzigen Träger für alle Empfindungen und Vorstellungen erforderen; es würde nur eine Vielheit von Trägern mit denselben inneren Zuständen übrig bleiben, wenn man jedes Nervenmolecül des Centralorgans für einen solchen Träger annehmen wollte. Um so mehr müsste dann auch hier die vollkommenste

Harmonie bezüglich aller dieser Träger stattfinden, wenn nicht die Einheit des Bewusstseins und mit ihr die Einheit des zweckmässigen Handels, wie sie erfahrungsmässig auf Grund innerer Seelenzustände herbeigeführt wird, ganz und gar beeinträchtigt werden sollte. Sodann möchte noch der Stoffwechsel, dem selbst das Gehirn unterworfen ist, einige besondere Schwierigkeiten der Annahme darbieten, dass die Nervenmolecüle Träger unserer Seelenzustände seien.

Kaum aber ist zu erwarten, dass man bei ernstlicher und eindringender Erwägung der psychischen Erscheinungen dem blossen gleichzeitigen Vorhandensein der verschiedenen Sinnesempfindungen in einem und demselben Gehirne eine besondere Bedeutung für das Bewusstsein beilegen wird. Mögen von einem Körper rasch nacheinander oder auch gleichzeitig Schall- und Aetherwellen ausgehen und dieselben die betreffenden Organe eines Individuums afficiren. Gesetzt nun, es entständen aus diesen Affectionen in dem Gehirne, und zwar in den Molecülen räumlich getrennter Organe, Ton- und Lichtempfindungen; so würde aus ihnen doch keineswegs die Vorstellung jenes Körpers als Eines Objects (mit mehreren Merkmalen) entstehen, so wenig als wenn die bezeichneten Empfindungen in zwei verschiedenen Gehirnen, die Lichtempfindungen in dem einen und die Tonempfindungen in dem anderen, vertheilt wären. Es wird nicht zu einer solchen Vorstellung kommen können, welche Art von physischer Wechselwirkung man sich auch zwischen den Molekülen der verschiedenen Centralorgane des Einen Gehirnes denken mag, es sei denn, dass man einen gegenseitigen vollständigen Austausch der inneren Zustände aller dieser Molecüle annehme, was dann wieder auf das Obige zurückführen würde. Sollen verschiedene Sinnesempfindungen in die Vorstellung Eines Objects, wie sie als Thatsache der inneren Erfahrung vorkommt, vereinigt werden, so müssen sie in Ein Bewusstsein fallen, und dies erfordert eben einen gemeinsamen, streng einfachen Träger aller jener Empfindungen.

380. So finden wir es höchst wahrscheinlich, dass Ein Element als gemeinsamer Träger aller psychischen Erscheinungen existirt, während die übrigen Elemente, welche die Nervenmolecüle constituiren, als Zuleiter der verschiedenen Reizzustände dienen. Es kann aber zu nichts frommen, dies Eine Element als ein continuirliches Ganze von bestimmter Ausdehnung zu betrachten.



Denn ist es räumlich ausgedehnt, so gibt es in ihm eine Vielheit von Theilen und Punkten, in welchen die verschiedenen einzelnen Empfindungen keinenfalls als isolirt festsitzend angenommen werden dürfen, wenn sie einen bestimmten, der inneren Erfahrung entsprechenden, gegenseitigen Einfluss aufeinander ausüben sollen. Vielmehr müssten sich diese Empfindungen in jenem continuirlichen Ganzen überall oder in einem bestimmten Punkte desselben gegenseitig durchdringen; da wo die eine wäre, müsste auch die andere sein.

Wir betrachten die Sinnesempfindungen, wie alle Vorstellungen, als Thätigkeiten und somit als innere intensive Zustände des Einen Elements, das wir Seele nennen. Dieselbe steht in bestimmter Wechselwirkung mit den Elementen des Gehirns und durch diese mit den Elementen des übrigen Nervensystems. Gemäss ihrer besonderen Qualität, durch welche sie sich von den sonstigen Elementen des Leibes unterscheidet, reagirt sie gegen diese in eigenthümlicher Weise, so dass auch ihre inneren Zustände im Vergleich zu denen anderer Elemente einen eigenthümlichen Charakter besitzen müssen.

Was nun das Vorstellen des Räumlichen insbesondere betrifft, so können wir geradezu sagen, dass dasselbe eine nothwendige Folge der strengen Einfachheit der Seele sei, sobald sie unter gewissen Umständen genöthigt wird, gegen eine Mehrheit von Reizen, die nicht in ein intensives Eins verschmelzen können, gleichzeitig zu reagiren. Die Vorstellung eines Complexes von Lichtempfindungen in der Form eines contuirlichen Nebeneinander erfordert ja, dass dieselben in Einem Zuge einheitlich zusammengefasst werden, und dies geschieht eben, wenn die Seele gegen die Erregungszustände, welche ihr von Seiten der Opticusfasern vermittelst gewisser Nervenelemente zugeführt werden, allzumal reagiren muss. — Mit dem Vorstellen des Räumlichen, wie es in der Seele selbst zu Stande kommt, wollen wir uns nun näher beschäftigen, indem wir die Besprechung einiger Fragen, die man in Rücksicht auf das Causalverhältniss des einfachen Seelenwesens zum Leibe erheben kann, den Schlussbetrachtungen dieses Kapitels vorbehalten.

381. Die Reizzustände der Nerven sind gleichfalls innere intensive Zustände derselben, wenn sie auch durch eine Lagenveränderung der einzelnen Nervenelemente veranlasst werden mögen.

Sind nun die Reize, welche die Seele von Seiten der Nerven zu percipiren hat, von durchaus gleicher Beschaffenheit, so werden sie in der Seele, wegen der strengen Einfachheit derselben, zu einem völlig intensiven Eins verschmelzen. Es wird aus ihnen allen nur Eine Empfindung von grösserer Intensität resultiren, als wenn jeder Reiz einzeln die Seele getroffen hätte. Sind dagegen die gleichzeitig auftretenden Reize verschiedenartig, so wird zwar die Seele gegen sie alle reagiren und sie auch, weil sie ein einfaches Wesen ist, einheitlich zusammenfassen, aber dieselben werden, vermöge ihrer Verschiedenheit, nicht zu einer einzigen Empfindung miteinander verschmelzen können, und zwar um so weniger, je grösser ihr Gegensatz ist.

Gesetzt nun, verschiedene Netzhautstellen werden gleichzeitig von homogenen Aetherwellen afficirt. Dann wird von ihnen die Seele zu mehreren gleichen Farbenempfindungen erregt, die in ihr zu einer einzigen Farbenempfindung von derselben Art verschmelzen, falls nicht die völlige Verschmelzung durch irgend welche Nebenbestimmungen verhindert wird. Abgesehen von einem solchen Hindernisse würden also die vielen gleichen Farbenempfindungen, welche in der Seele entstehen, wenn der Blick auf einer gleichfarbigen Fläche ruht, nicht die Vorstellung der letzteren geben können, und zwar eben deshalb nicht, weil sie in der Seele zu einem einzigen intensiven Eins miteinander verschmelzen müssten.

382. Nach Herbart's*) Theorie des räumlichen Vorstellens sind nun auch die ursprünglichen Auffassungen des Auges nicht räumlich; vielmehr fallen die Wahrnehmungen aller farbigen Stellen in der Einheit der Seele zusammen, wobei von dem Rechts und Links, dem Oben und Unten, was auf der Netzhaut des Auges stattfand, jede Spur verloren geht. Aber beim Sehen ist das Auge in unaufhörlicher Bewegung, und durch diese Bewegung wird die Vorstellung des Räumlichen erst erzeugt, die sich nach vollendeter Ausbildung wohl auch auf die Auffassungen des ruhenden Blickes

*) s. Psychologie als Wissenschaft, neu gegründet auf Erfahrung, Metaphysik und Mathematik, Königsberg 1825. Th. II. S. 120 ff.; — Lehrbuch zur Psychologie, 2. Aufl. 1834. S. 132; — auch G. Schilling, Lehrbuch der Psychologie, Leipzig 1851. S. 61; und W. F. Volkmann, Grundriss der Psychologie nach genetischer Methode etc. Halle 1856. S. 191.

überträgt. Eben so verhält es sich mit den räumlichen Wahrnehmungen des Tastsinnes.

Wenn der Blick längs einer Fläche hin- und hergleitet, entstehen mit den Farbenempfindungen zugleich, indem jede Bewegung des Auges successive durch die besondere Thätigkeit bestimmter Muskeln vollzogen wird, gewisse Muskelempfindungen, die je nach der besonderen Stellung des Auges eine besondere Eigenthümlichkeit besitzen. So entspricht jeder Stelle, die durch eine unwillkürliche Bewegung des Auges erreicht ist, eine eigenthümliche Muskelempfindung. Und all' die verschiedenen Muskelempfindungen, welche während der Bewegung des Auges in bestimmter Richtung hervortreten, compliciren sich mit den gleichzeitig in der Seele auftauchenden Farbenempfindungen. Es entsteht also bei dem Hin- und Herlaufen des Blickes auf einer Ebene eine Reihe verschiedener Muskelempfindungen, welche Glied für Glied mit einer Farbenempfindung associirt ist. Mögen nun auch die Farbenempfindungen, die beim Anblick einer einfarbigen Fläche entstehen, qualitativ gleich sein, so werden sie doch wegen ihrer Association mit den verschiedenen Muskelempfindungen nicht zu einer einzigen intensiven Farbenempfindung miteinander verschmelzen, sondern durch die Glieder in der Reihe der Muskelempfindungen auseinander gehalten werden und in der Form eines continuirlichen Nebeneinander auftreten können. — In ganz ähnlicher Weise bildet sich, wenn das tastende Organ, die Hand, auf einer Fläche hin- und hergleitet, eine Reihe von Muskelempfindungen, die sich gliedweise mit den reinen Tastempfindungen associiren, so dass auch diese ein Bild der betasteten Fläche in der Form eines continuirlichen Nebeneinander gewähren müssen.

Da den bezeichneten Muskelempfindungen, obschon sie während der Bewegung des Auges oder der Hand merklich und bei den verschiedenen Stellungen des Gliedes auch unterschiedlich im Bewusstsein auftreten, doch kein bestimmt ausgesprochenes Quale entspricht, und dieselben sich auch wegen ihres Gegensatzes zum Theil in der Seele hemmen und verdunkeln, so erscheint nur das mit ihnen Associirte, nämlich die Farben- und Tastempfindung, als ein räumlich Ausgebreitetes.

383. In der Absicht, die Herbart'sche Theorie des räumlichen Vorstellens hier noch specieller zu entwickeln, machen wir

zunächst aufmerksam auf ein von Herbart mathematisch*) entwickeltes Reproductionsgesetz, nämlich auf die Art und Weise, wie zwei miteinander complicirte Vorstellungen einander wieder zu erwecken vermögen. Tritt auf Grund einer äusseren Veranlassung eine Vorstellung A ins Bewusstsein, so wird sie hier bereits vorhandene andere innere Zustände antreffen, die mit ihr in Conflict gerathen, um dessenwillen sie in Rücksicht ihres Vorgestellten eine Hemmung und Verdunkelung erfahren muss, ohne dass damit eine Vernichtung ihrer selbst verbunden ist. Wenn zwei qualitativ entgegengesetzte Vorstellungen widereinander wirken, d. h. sich hemmen, so bleibt jede dieser Vorstellungen, als Thätigkeit der Seele, immerhin bestehen, nur der Erfolg dieser Thätigkeit, nämlich die Klarheit der einzelnen Vorstellung im Bewusstsein, erfährt eine mehr oder weniger bedeutende Verminderung. Die verdunkelte Vorstellung gewinnt aber sofort, vermöge ihres eigenen Strebens, einen höheren Klarheitsgrad, wenn das Hinderniss, das in der Gegenwirkung anderer Vorstellungen liegt, irgendwie zum Weichen gebracht wird.

Nun komme, ebenfalls in Folge einer äusseren Einwirkung, zu der schon im Bewusstsein befindlichen Vorstellung A eine andere B, so wird dieselbe, ungehemmt wie sie ist, oder doch viel weniger gehemmt als die erste A sich mit dieser verbinden, so dass nun beide Vorstellungen, A und B, eine Gesammtthätigkeit (der Seele) bilden, vermöge deren sie jeder nachmaligen Hemmung oder Verdunkelung durch andere Vorstellungen gemeinschaftlich widerstehen. Sind aber beide Vorstellungen durch andere aus dem Bewusstsein verdrängt, d. h. ganz verdunkelt, so wird die eine, wenn sie frisch wieder erzeugt wird, auch die andere mit ins Bewusstsein emporheben oder dieselbe, wie man kurz zu sagen pflegt, reproduciren. Doch ist ein Unterschied in der Reproduction der einen Vorstellung durch die andere, je nachdem A oder B zuerst wieder ins Bewusstsein tritt.

384. Die Intensitäten der beiden Vorstellungen A und B seien gleich. Der Klarheitsgrad aber, den die Vorstellung A hatte, als sie sich mit der anderen Vorstellung B associirte, sei durch r be-

*) Psychologie als Wissenschaft. Th. I. S. 268 ff., insbesondere S. 289 ff.; — s. auch mathematisch psychologische Untersuchungen. Göttingen 1839. Heft I. S. 184 ff.

zeichnet. Erhebt sich nun zuerst A wieder im Bewusstsein, so strebt es die Vorstellung B zu reproduciren, und zwar bis zu demjenigen Klarheitsgrade, welchen diese Vorstellung besass, als sie mit A zu einer Gesammtthätigkeit verschmolz. Da aber B später ins Bewusstsein trat als A und daher auch weniger als dieses im Zeitpunkte seiner Vereinigung mit ihm durch andere Vorstellungen verdunkelt war, so bestand ohne Zweifel die Vorstellung B noch mit einer grösseren Klarheit im Bewusstsein als die Vorstellung A. Bezeichnen wir nun den Klarheitsgrad, welcher der Vorstellung B in dem Moment eigen war, wo sie sich mit A associirte, durch ϱ, so ist $\varrho > r$. Und dieses ϱ würde der anfänglichen Intensität von B gleich zu setzen sein, wenn das letztere im Augenblick seiner Verbindung mit A noch völlig ungehemmt gewesen wäre.

Tritt nun, wie wir annahmen, zuerst A wieder ins Bewusstsein, so strebt es B bis zu dem Klarheitsgrade ϱ mit sich emporzuziehen. Und die Kraft, die es hierzu verwendet, ist $= r$. Dagegen strebt B, wenn es zuerst hervortritt, A bis zu dem Klarheitsgrade r zu reproduciren; und die Kraft, die es dazu aufwendet, ist $= \varrho$. Beide Grössen, r und ϱ, zusammengenommen bestimmen den Grad der Verbindung unter den beiden Vorstellungen A und B.

Nun ist aber $\varrho > r$, d. h. die reproducirende Kraft der Vorstellung B grösser als die der Vorstellung A. Und jene grössere Kraft sucht die Vorstellung A bis zu dem geringeren Klarheitsgrade r, dagegen umgekehrt die geringere reproducirende Kraft von A die Vorstellung B zu dem grösseren Klarheitsgrade ϱ zu reproduciren. Mit anderen Worten: die Vorstellung B hebt ihre mitverbundene A, weil sie dieser mit einem grösseren Klarheitsgrade associirt ist, rascher zu dem greringeren Klarheitsgrade r, während umgekehrt die Vorstellung A, die mit einem geringeren Klarheitsgrade r der Vorstellung B verbunden ist, diese letztere langsamer bis zu dem grösseren Klarheitsgrade ϱ reproducirt. Jede Vorstellung strebt also die mit ihr associirte bis zu demjenigen Klarheitsgrade zu reproduciren, in welchem sich dieselbe mit ihr associirte; allein die Geschwindigkeit, womit dies geschieht, ist verschieden,' und hängt von dem Klarheitsgrade ab, den die reproducirende Vorstellung besass, als sie sich mit der anderen zu einer Gesammtthätigkeit verband.

Sind mit verschiedenen Klarheitsgraden $r, r', r'', \ldots.$ einer und derselben Vorstellung A mehrere andere verbunden, so wirkt sie auf die letzteren der Zeit nach in derselben Reihenfolge, worin ihre Klarheitsgrade $r, r', r'', \ldots,$ durch welche sie mit den anderen verbunden ist, der Grösse nach stehen. Nehmen wir der Einfachheit wegen die anderen Vorstellungen $B, B', B'', \ldots.$ von gleicher Intensität an, und ist A mit diesen Vorstellungen der Reihe nach in den Klarheitsgraden $r, r', r'', \ldots.$ verbunden; dann wirkt A, wenn es sich von Neuem im Bewusstsein erhebt, auf die Reproduction von $B, B', B'', \ldots.$ mit den Kräften $r, r', r'', \ldots.$ Ist nun $r > r' > r''$, so reproducirt A am schnellsten B, langsamer B', noch langsamer B'', u. s. f.

385. Es werde nun eine ganze Reihe von Vorstellungen $a, b, c, d, e, f, g, \ldots.$ nacheinander, in Folge einer successiven äusseren Wahrnehmung gegeben. Dann ist a durch andere, gerade im Bewusstsein vorhandene Vorstellungen, vom ersten Augenblick der Wahrnehmung an und während ihrer Dauer, einer Hemmung ausgesetzt, so dass es, wenn b hinzukommt, bis zu einem gewissen Grade verdunkelt mit dieser noch wenig oder gar nicht verdunkelten Vorstellung in Verbindung tritt. Folgt nun c, so associirt sich dieses, fast ungehemmt, mit dem sich verdunkelnden b und dem schon mehr verdunkelten a. Eben so verbindet sich d bei seinem Eintritt ins Bewusstsein in verschiedenen Abstufungen mit $a, b, c,$ und zwar mit einem grösseren Klarheitsgrade von c, mit einem geringeren von b, und mit einem noch geringeren von a. In derselben Weise geht es fort mit $e, f, g, \ldots.$ So wird a bis zu einem gewissen Klarheitsgrade r_1 verdunkelt sein, wenn es sich mit b verbindet, und zu immer geringeren Klarheitsgraden $r_2, r_3, r_4\, r_5, r_6, \ldots.$ wenn es sich mit den successiv eintretenden Vorstellungen $b, c, d, e, f, g, \ldots.$ associirt. Sollte a bereits vollständig verdunkelt sein, wenn eine nach g eintretende Vorstellung im Bewusstsein auftaucht, so bleibt diese mit a unverbunden. Wie aber a in abgestuften Klarheitsgraden mit den ihm folgenden Vorstellungen b, c, d, e, f, g verbunden wird, associirt sich auch eine jede der übrigen Vorstellungen mit der ihr nachfolgenden, also b mit $c, d, e, f, g, \ldots,$ d mit $e, f, g, \ldots.,$ u. s. f. Dagegen ist das letzte Glied, bei dem die Wahrnehmung abbricht, nur mit den vorhergehenden verbunden, in der Art, dass es selbst in fast voller Klarheit associirt ist mit immer kleiner werdenden Klarheits-

graden der vorhergehenden Vorstellungen, also mit dem ersten grössten Klarheitsgrade von *f*, dem zweiten kleineren von *e*, dem dritten wieder geringeren von *d*, und so rückwärts weiter. Daher ist jedes mittlere Glied der Reihe, wie *d*, selbst in fast voller Klarheit mit den abgestuften Klarheitsgraden seiner vorhergehenden Glieder, dagegen mit seinen nachfolgenden, fast völlig klaren Gliedern nur nach einer Stufenfolge immer kleiner werdender, ihm selbst zugehöriger, Klarheitsgrade verbunden.

386. Jene Reihe kann nun, nachdem sie eine Zeitlang durch die Wirkung anderer entgegengesetzter Vorstellungen im Bewusstsein verdunkelt war, vollständig wieder erweckt werden, wenn das eine oder andere ihrer Glieder mit hinreichender Intensität, sei es nun durch wiederholte Wahrnehmung oder auf eine andere Weise, ins Bewusstsein tritt. Jedes Glied in der Reihe strebt bei erneuertem Hervortreten auf eigene Weise die übrigen Glieder der nämlichen Reihe zu reproduciren. Erhebt sich das Anfangsglied *a* zuerst wieder, so wirkt es in der Folge der Klarheitsgrade $r_1, r_2, r_3, \ldots$, mit denen es den Vorstellungen *b*, *c*, *d*, ... associirt ist, auf diese reproducirend. Da es nun in einem grösseren Klarheitsgrade r_1 mit *b*, in einem geringeren r_2 mit *c*, in einem noch geringeren r_3 mit *d*, u. s. f. verknüpft ist, während *b*, *c*, *d*, ... alle nur wenig gehemmt mit den eben angeführten Klarheitsgraden von *a* verbunden sind; so strebt *a* die Vorstellungen *b*, *c*, *d*, ... alle bis zu den Helligkeitsgraden zu reproduciren, die sie hatten, als sie sich mit ihnen associirten; allein es wirkt, wegen der Stufenfolge der Grade $r_1, r_2, r_3, \ldots$, am schnellsten auf *b*, langsamer auf *c*, noch langsamer auf *d*, u. s. f. Die Reihe läuft also ab, wie sie gegeben war. Wird dagegen das letzte Glied der Reihe, es sei *g*, unmittelbr wiedergegeben, so wirkt dasselbe mit seiner ganzen Stärke zugleich auf alle mit ihm verbundenen Glieder; denn es selbst trat fast ungehemmt mit allen vorausgehenden Gliedern in Verbindung, aber mit einem grösseren Klarheitsgrade von *f*, mit einem geringeren von *e*, mit einem noch geringeren von *c*, u. s. w. So reproducirt es nun mit derselben Kraft gleichzeitig alle seine vorausgehenden Glieder in derjenigen abgestuften Klarheit, in welcher sie mit ihm verbunden sind. — Wenn endlich irgend ein mittleres Glied, *d*, zuerst wieder gegeben wird, so reproducirt dieses die ihm in der Reihe folgenden Vorstellungen nacheinander, wie es oben an *a* dargethan ist, dagegen die ihm vorausgehenden

gleichzeitig in abgestufter Klarheit. Und in der That, wenn man an irgend etwas aus der Mitte einer uns bekannten Reihe erinnert wird, so stellt sich das Vorhergehende auf einmal in abgestufter Klarheit dar, während das Nachfolgende in unseren Gedanken abläuft, wie die Reihenfolge es mit sich bringt. So übt also jedes Glied in der Reihe auf die anderen eine doppelte Reproduction aus; eine nacheinander erfolgende, successive und eine gleichzeitig erfolgende, simultane Reproduction. Bezeichnet man die Intensität einer einzelnen Vorstellung durch die Länge einer geraden Linie, und nimmt man in Bezug auf die obige Reihe an, dass die nacheinander in das Bewusstsein fallenden Vorstellungen ursprünglich von gleicher Stärke seien, so lassen sich die beiderseitigen Reproductionen, die von einem mittleren Gliede der Reihe ausgehen, allenfalls wie in nebenstehender Figur veranschaulichen, worin die Linien *e*, *f*, *g*, .. die Vorstellungen andeuten, welche von *d* aus nacheinander zu gleicher Klarheit reproducirt werden, während die Linien *a*, *b*, *c* die von demselben Gliede, *d*, bewirkte simultane Reproduction der vorhergehenden Glieder bezeichnen.

Fig. 189.

387. Das zuvor erörterte Reproductionsgesetz gilt im Wesentlichen auch dann noch, wenn die Glieder der Reihe *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *g*, ... nicht einfache Vorstellungen, sondern irgend welche Complexe derselben sind; und man kann von ihm sofort eine Anwendung auf das Vorstellen des Zeitlichen machen. Dasselbe erfordert erfahrungsmässig, dass eine Reihe von Ereignissen, die wir vorstellen, zwischen einem bestimmten Anfangs- und Endpunkte eingeschlossen sei. Während die einzelnen Glieder von dem Anfangspunkte aus nacheinander ablaufen, werden sie zugleich als feststehend überschaut. Es genügt also weder die successive, noch die simultane Reproduction für sich allein, um die Vorstellung eines Zeitverlaufes herbeizuführen; denn die nacheinander erfolgende Reproduction gewährt uns nur ein einfaches Ablaufen der Reihe, wie es z. B. beim gedächtnissmässigen Memoriren der Fall ist, und die gleichzeitig erfolgende Reproduction nur ein ruhiges Stehen der Glieder in abgestufter Klarheit. Durch die vereinigte Wirksamkeit beider Reproductionen kann dagegen die Vorstellung eines Zeitverlaufes zu Stande kommen. Wird nämlich von einer Reihe wohl associirter successiver Wahrnehmungen am Ende die erste und letzte wiederholt, so reproduciren beide die zwischenliegenden

Glieder, aber jede in ihrer Weise. Die Reproduction des Endpunktes stellt die ganze Reihe auf einmal vor Augen, jedoch mit rückwärts abnehmender Klarheit, so dass die vordersten Glieder der Reihe wie in einem dunklen Hintergrunde erscheinen. Zugleich durchläuft die Reproduction des Anfangspunktes alle Glieder von vorn nach hinten, indem sie die früheren Glieder schneller als die späteren emporhebt. Wenn also die ganze Reihe von Ereignissen bereits verdunkelt, d. h. vergessen ist, und es wird nun durch eine Wahrnehmung oder sonst wie das letzte und erste Glied wiedergegeben, so wird durch das erste Glied die ganze Reihe nacheinander als ein Verfliessendes ins Bewusstsein gebracht, während durch die simultane Reproduction vom Endgliede aus alle Glieder der Reihe in rückwärts abnehmender Klarheit zugleich überschaut werden.

Dieser Vorgang findet bei allen Zeitstrecken statt, deren Glieder bestimmte zeitliche Ereignisse darstellen. Die Richtung der Reproduction, durch welche die einzelnen Glieder nacheinander ins Bewusstsein gebracht werden, ist für alle Zeitstrecken dieselbe; sie fallen daher alle in Einer Richtung zusammen, oder, was dasselbe, die Zeitreihe hat nur eine Dimension. Wenn nun aber mehrere bereits ausgebildete Zeitstrecken von verschiedenem Inhalte gleichzeitig reproducirt werden, wozu das menschliche Leben Veranlassung genug bietet, so verdunkelt sich dieser Inhalt, in Folge des Gegensatzes zwischen seinen einzelnen Gliedern dergestalt, dass von jenen Reproductionen nur noch die reine Form, nämlich das Nacheinader der Glieder, zurückbleibt, was denn zur Vorstellung der leeren Zeit führt.

388. Wie das Vorstellen des Zeitlichen erfordert auch das Vorstellen des Räumlichen die vereinigte Wirksamkeit jener beiden Reproductionen, so dass jedes Glied in der Reihe seine folgenden nacheinander, seine vorausgehenden hingegen gleichzeitig in abgestufter Klarheit reproducirt. Ausserdem muss aber im Vorstellen einer Raumreihe noch jedes Glied als ein erstes betrachtet werden können, welches nicht allein seine folgenden, sondern auch seine vorhergehenden nacheinander reproducirt. Haben wir also die Reihe *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, so muss ein mittleres Glied, z. B. *d*, die Glieder *c*, *b*, *a* nicht minder wie *e*, *f*, *g* sowohl nacheinander als auch gleichzeitig reproduciren. Dazu gehört, dass die Glieder *der Reihe* in der Wahrnehmung wenigstens zweimal, von *a* nach *g*

und auch umgekehrt von *g* nach *a*, gegeben werden, wie dies stattfindet, wenn der Blick des bewegten Auges oder das tastende Organ, die Hand, auf einer Fläche in irgend einer bestimmten Richtung hin- und hergleitet. Durch die rückkehrende Wahrnehmung werden die vorausgegangenen Glieder zu nachfolgenden; *g* associirt sich mit *f, e, d*,.. in derselben Weise wie zuvor *a* mit *b, c, d*,.. Die nachmalige Wahrnehmung eines mittleren Gliedes *d* reproducirt dann beiderseits in abgestuften Klarheitsgraden zugleich *abc* und *def*, und auch nacheinander zu höheren Klarheitsgraden zunächst *c* und *e*, dann *b* und *f*, u. s. w. Werden aber zwei Grenzglieder, *a* und *g*, unmittelbar wiedergegeben, so reproducirt jedes dieser Glieder alle übrigen bis zum letzten sowohl simultan in abgestuften Klarheitsgraden als auch successiv zu den höheren Klarheitsgraden, die unter den gegebenen Umständen überhaupt möglich sind. Indem nun die successiven Reproductionen der Glieder von den beiden Grenzgliedern *a* und *g* aus gegeneinander laufen und sich ins Gleichgewicht setzen, verwandelt sich der Abfluss der Reihe in einen Stillstand ihrer Glieder, das Nacheinander in ein Nebeneinander; und die Reihe erscheint dann als Raumreihe, worin jedes Glied seine bestimmte Stelle zwischen den anderen Gliedern hat.

389. Wir haben bisher stillschweigend vorausgesetzt, dass die Glieder *a, b, c, d, e, f*, ... irgend einen qualitativen Gegensatz darbieten, der verhindert, dass sie miteinander in der Seele zu einem einzigen intensiven, unterschiedslosen Zustande verschmelzen. So müsste, falls nichts entgegenwirkt, die Summe homogener Farbenreize, die in der Seele entsteht, wenn der Blick auf einer einfarbigen Fläche ruht, zu einer einzigen einfachen Farbenempfindung zusammenfliessen. Wenn dagegen der Blick längs einer solchen Fläche in einer gewissen Richtung hin- und zurückgleitet, erzeugt sich durch die Bewegung des Auges in der Seele eine Reihe fein abgestufter Muskelempfindungen $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \ldots$, die sich mit den successiv erzeugten homogenen Farbenempfindungen a, a', a'', a''', a'''' gliedweise $\frac{\alpha,\ \beta,\ \gamma,\ \delta,\ \varepsilon, \ldots}{a\ \ a'\ \ a''\ \ a'''\ \ a''''\ldots}$ associiren (§. 382) und die letzteren in der Form einer Reihe, auf die zuvor (§. 388) angegebene Weise, zur Darstellung bringen. Viele solcher Raumreihen, die sich in der Seele durch die mannigfach drehende Bewegung des Auges erzeugen, bilden zusammen ein Reihengewebe,

das sich zur Vorstellung der Fläche entfaltet, worin nun jedes Glied der Durchkreuzungspunkt unzählig vieler Raumreihen ist.

So besteht also das Vorstellen des Räumlichen im Wesentlichen darin, dass die Eine Seele eine Vielheit von Gliedern (Empfindungen) in einem gleichzeitigen Zwischen- und Nebeneinander festhält. Das Vorgestellte des ganzen Complexes erscheint als ein räumliches Nebeneinander, so als ob es ausserhalb der Seele wäre, während doch der Actus des Vorstellens selbst rein intensiv ist und bleibt. Das Vorstellen des Räumlichen ist nicht selbst räumlich.

390. Lotze*) hat gegen die Herbart'sche Theorie des räumlichen Vorstellens ein Bedenken erhoben, dass dieselbe jedoch, wie mir scheint, nicht trifft. Das Auge, sagt Lotze, habe zuerst den Punkt *a* gesehen und diese Empfindung mit dem Muskelgefühle α associirt; es gehe zum Punkte *b* über durch das Muskelgefühl β, zu *c* durch das Gefühl γ, u. s. w. „Nun mag es sich zurückwenden und so allmälig die Reihe *dcba* rückwärts durchlaufen, deren jeder Punkt sich mit den entsprechenden Muskelgefühlen $\delta, \gamma, \beta, \alpha$ verknüpft. Wie man sich auch diesen Process variirt denken mag, so entsteht doch daraus von selbst noch nicht die Nothwendigkeit, dass diese Punkte als räumlich nebeneinander befindliche angesehen werden müssten. Vielmehr müsste dazu noch Jemand da sein, welcher zu der mit ihren Associationen aus Farben und Muskelgefühlen beschäftigten Seele sagte: wenn du erst von *a* bis *d* eine Reihe Vorstellungen erzeugt hast, und du erzeugst die andere Reihe *d* bis *a*, so ist die letztere nicht eine ganz andere, die sich an die vorige anfügt, so dass die Gesammtheit *d* eines Vorstellens die Reihe *abcddcba* wäre, sondern die zweite Hälfte davon ist nur die wiederholte Vorstellung derselben Objecte, welche die erste Hälfte darstellt, so dass das Object einfach und feststehen geblieben ist, während das Vorstellen sich an ihm hin- und herbewegte. Oder kürzer, es müsste der Seele noch einmal besonders gesagt werden, dass sie nicht eine ganze gleiche, aber andere, sondern dieselbe Reihe durchmisst. Singen wir die Töne der Scala *abcd*, so verknüpft sich mit jedem ein Muskelgefühl, das graduell vergleichbar ist, mit dem jedes andern; singen wir die Scala

*) Art. Seele und Seelenleben in R. Wagner's Handw. der Physiologie, Bd. III. Abth. I. S. 176; — und Medicinische Psychologie, S. 331 f.

rückwärts, so kehren mit denselben Tönen dieselben Muskelgefühle wieder, aber Niemand glaubt, man erhasche beim Zurückgehen denselben Ton wieder, den man am Anfang angab, sondern man weiss, dass es nur ein qualitativ gleicher ist. Die umgekehrte Scala deckt nicht in verkehrter Richtung die aufsteigende; es wird aus alle dem nichts Räumliches. Damit dies entstehe, ist vor allen Dingen ein Erforderniss nothwendig; es müssen mehrere Vorstellungen gleichzeitig und in ganz bestimmten Verhältnissen gegeben sein, so dass der eine Theil derselben noch nicht verschwindet, während die Bewegung einen neuen herbeiführt, der sich nun sogleich an diesen Rest in bestimmter Bedeutung anschliessen kann. Könnte das Auge nur einen Punkt sehen und würde durch jede Drehung es dergestalt in eine ganz neue Welt versetzt, dass es mit völligem Verschwinden des vorigen einen ganz neuen Eindruck erhielte, so wäre es ganz unmöglich zu enträthseln, was denn durch diesen Uebergang eigentlich bewerkstelligt worden sei, und wie sich das Neue an das Alte knüpft."

391. Blicken wir nun zurück auf die Herbart'sche Theorie, so fordert diese, dass der vorige Eindruck wenigstens in der Seele noch fortdauere, wenn der folgende hinzukommt, der sich dann an jenen in bestimmter Weise anschliesst. Aber die Vorstellung des Räumlichen entsteht nach dieser Ansicht erst dann, wenn eine Mehrheit von Vorstellungen gleichzeitig und in ganz bestimmten Verhältnissen gegeben ist; nur werden diese erst herbeigeführt durch eine geordnete Reihe successiver Wahrnehmungen und durch die hierbei in Wirksamkeit tretenden Reproductionsgesetze. Wenn durch die hin und hergehende Wahrnehmung des Auges sich eine Reihe associirter Muskel- und Farbenempfindungen gebildet hat, in der Art, dass jedes Glied mit allen anderen in abgestufter Klarheit verschmolzen ist, und zwar gleichmässig nach beiden Seiten hin; so erheben sich in Folge jener doppelten Reproduction, die wir besprochen haben, alle Glieder zumal in einem bestimmten Zwischen- und Nebeneinander, das allerdings seinen Grund hat in der vorausgegangenen successiven Wahrnehmung. Jedes Glied in der Reihe der Farbenempfindungen *a*, *b*, *c*, *d*, *e* übt auf alle anderen eine zweifache Reproduction aus. So hebt z. B. das Glied *c* die Glieder *ab* und *cd* gleichzeitig in abgestufter Klarheit, nämlich *b*, *d* klarer als *a*, *e* und dieselben Glieder auch nacheinander empor, und zwar zunächst *b* und *d*, dann *a* und *e*. Nimmt das Auge

wieder die Stellung ein, die mit der Muskelempfindung α die Farbenempfindung *a* erzeugte, so werden die Glieder *bcde* ebenfalls simultan in abgestufter Klarheit und auch nacheinander reproducirt. Auch können die so reproducirten Glieder selbst wieder einen reproducirenden Einfluss rückwärts, nach *a* hin, ausüben; allein das gleichzeitige klare Vorstellen einer Mehrheit von Gliedern, worin sie stillstehend in ihrem bestimmten Nebeneinander erscheinen, tritt doch, selbst nach der Herbart'schen Theorie, erst dann ein, wenn die verschiedenen Reproductionen sich von beiden Seiten her mit gleicher oder fast gleicher Stärke begegnen, so dass die beiden successiven Reproductionen widereinander laufend sich ins Gleichgewicht setzen können. Hierzu gehört aber ein gleichzeitiges Gegebensein von wenigstens zwei Grenzgliedern: in Bezug auf unsere Reihe etwa von *a* und *e*.

Wir dachten uns die Reihe der Farbenempfindungen *a*, *b*, *c*, *d*, *e* mittelst der Muskelempfindungen α, β, γ, δ, ε durch die Bewegung des Blicks längs einer einfarbigen Fläche erzeugt, so dass also die Glieder der ersten Reihe alle gleiche Farbenempfindungen bezeichnen. Wendet sich nun das Auge zurück von der Stellung ab, welche der Muskelempfindung ε entspricht, so entsteht zunächst wieder mit der Farbenempfindung *d* die Muskelempfindung δ, die mit der bereits früher erzeugten Empfindung derselben Art verschmilzt. Zugleich werden die früheren Glieder der Reihe in abgestufter Klarheit simultan reproducirt. Eben so verschmilzt auch die von Neuem eintretende Muskelempfindung γ mit der früheren identischen, wie nicht minder die Farbenempfindung *c* mit der früheren ihr gleichen. Dasselbe gilt von β und α. Wahrscheinlich ist nun wohl doch nicht, dass die zum zweiten Mal wiederholten Wahrnehmungen sich an die ersten identischen nach Art der Reihe *abcdeedcba* anschliessen; vielmehr ist zu erwarten, dass das Vorstellen, indem die Empfindungen *edcba* sofort mit den früheren identischen verschmelzen, sich ganz innerhalb der schon erzeugten Reihe, nur wegen der umgekehrten Aufeinanderfolge der verschiedenen Muskelempfindungen in umgekehrter Richtung bewegt.

392. Vielleicht könnte man indess gegen die Herbart'sche Ansicht einwenden, dass sie das anfängliche Sehen gewissermassen zu punktuell auffasse und zu wenig Rücksicht auf die eigenthümliche Beschaffenheit des Sehorgans nehme.

Das Auge erzeugt bei seinem Hingleiten über eine Fläche die Reihe der Muskelempfindungen $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ nebst den Farbenempfindungen *a, b, c, d*, indem es durch seine Bewegung eine Anzahl von Punkten (jener Fläche) in raschem Nacheinander auf die empfindlichste Stelle der Netzhaut bringt. Befindet sich nun auf dieser Stelle das Bild des Punktes, welchem wegen der besonderen Stellung des Auges gerade das Muskelgefühl δ und die Farbenempfindung *d* entspricht, so werden die vorausgegangenen Punkte, an denen die bezeichnete Stelle der Retina bereits vorüber ist, sich doch zum Theil noch auf der Retina darstellen. Und daher können denn auch die während der Bewegung des Auges schon gewonnenen Glieder *a, b, c* nicht als blosse Vorstellungen in der Seele verweilen; sondern müssen in derselben, durch fortdauernde Lichtreize verstärkt, noch als sinnliche Empfindungen existiren, die an ihrer völligen Verschmelzung zu e i n e r intensiven Empfindung durch die mit ihnen associirten Muskelgefühle verhindert werden. Eben so ist es, wenn das Auge zu seiner Anfangsstellung, die das Muskelgefühl α und die Farbenempfindung *a* bringt, zurückkehrt. Es wird dann immer noch eine gewisse Anzahl von Gliedern *b, c, d* sinnlich gegenwärtig sein, so dass nun auch von beiden Seiten her zugleich jene widereinander laufenden Reproductionen geschehen können, durch welche die Vorstellung des Räumlichen, als eines stillstehenden continuirlichen Nebeneinander, ihre Vollendung erreicht. So könnte schon durch wenige Bewegungen des Auges um seine horizontale Quer- und vertikale Höhenaxe ein flächenhaftes Sehen herbeigeführt werden.

Singen wir die Töne der Scala *abcd*, wie es oben (S. 570 f.) Lotze verlangt, auf- und abwärts, so kann daraus allerdings nichts Räumliches, sondern höchstens nur etwas Zeitliches entstehen. Sind wir zu dem Tone *a* zurückgekehrt, so ist keiner der anderen Töne mehr in der Art sinnlich gegenwärtig, dass er alle übrigen sowohl simultan in abgestufter Klarheit als auch nacheinander zu höheren Klarheitsgraden emporheben könnte, während dies zugleich von *a* aus geschieht. Die Bedingung zu diesen Reproductionen liegt beim Sehen in der Einrichtung des Organs, nämlich darin, dass während der Bewegung des Auges das Bild eines Objects sich continuirlich auf der Netzhaut verschiebt. Indem die einzelnen Theile desselben nacheinander auf die empfindlichste Stelle der Netzhaut gelangen, sind die übrigen, wie bereits

oben bemerkt, in jedem Augenblicke noch mehr oder minder deutlich sinnlich gegenwärtig, und eben hierdurch ist es möglich, dass die durch die erste successive Wahrnehmung erzeugte Reihe sofort von vielen Gliedern zugleich, auf die angegebene Weise, reproducirt werden kann.

393. Betrachten wir die Stäbchen- und Zapfenschicht der Retina (S. 222 f.) als das peripherische, lichtpercipirende Organ, so lässt sich vielleicht in Bezug auf den gelben Fleck annehmen, dass jede Drehung des Auges, durch welche das Bild eines Lichtpunktes von einem Zäpfchen zum nächsten bewegt wird, schon eine eigenthümliche Muskelempfindung mit sich bringt.

Beginnt aber das Auge, nachdem es durch eine Bewegung in bestimmter Richtung eine Reihe von Muskel- und Farbenempfindungen erzeugt hat, sich umzuwenden, so mögen nun auch die in der Seele bereits vorhandenen und reproducirten Muskelgefühle, die durch die mit ihnen associirten Farbenempfindungen wach erhalten werden, dem Auge die Tendenz zu einer Bewegung ertheilen, welche den Blick in der nämlichen Richtung zum Ausgangspunkte zurückführt. Ist also die Reihe der Muskelempfindungen $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ nebst den Lichtempfindungen a, b, c, d gebildet und das Auge bei d angelangt, so werden jene zuerst genannten Empfindungen den Blick rückwärts treiben, falls nicht ein noch weiter seitlich, in der Richtung von a nach d, gelegener Reiz das Auge zu stark in Anspruch nimmt. Es macht sich dann zunächst γ, dann β und endlich α in grösserem Masse geltend, indem diese Empfindungen die Muskeln des Auges, vermittelst der Nerven, nacheinander in diejenige Thätigkeit zu versetzen suchen, durch welche sie selbst erzeugt wurden.

394. Wie ungemein fein übrigens die Bewegungen des Auges sind, ergibt sich aus einigen von E. H. Weber*) mitgetheilten Beobachtungen. Derselbe liess, um durch Versuche zu finden, wie kleine Bewegungen wir noch mit den Augen mit Sicherheit ausführen können, Personen, die vorzüglich gute Augen hatten, schwarze parallele Linien zählen, die 0,025 Par. Lin. breit und durch eben so breite weisse Zwischenräume von einander getrennt waren. Ein Beobachter konnte sie nun mit zwei Augen schon bei einer Entfernung von 9 Par. Zollen vom Auge zählen, wogegen es ihm

*) Ber. d. Sächs. Ges. d. Wiss. in Leipzig, 1852. S. 180.

mit einem Auge nur bei einer Entfernung von 7 Zollen gelang. Um eher zu wenig als zu viel anzunehmen, betrachtete Weber diese geringere Entfernung als diejenige, in welcher die Zählung mit zwei Augen mit Sicherheit stattfand. Es folgte dann, dass das Bild einer solchen Linie oder eines Zwischenraumes auf der Retina 0,00192 Par. Linie, d. h. nahe $\frac{1}{521}$ Par. Lin. breit war. Nimmt man auch nur an, bemerkt Weber, dass Menschen, die mit weniger scharfen Augen begabt sind, dieselben so zu drehen vermögen, dass der empfindlichste Theil der Retina mit Sicherheit um $\frac{1}{100}$ Par. Lin. fortgerückt wird, so ist das schon eine so kleine Bewegung, wozu in der Mechanik eine mikrometrische Vorrichtung nöthig ist. Die beiden Augen mussten also so um ihren Mittelpunkt gedreht werden, dass successiv die Bilder der Linien auf den in der Augenaxe liegenden Theil der Retina fielen, nämlich dass der empfindlichste Theil der Retina regelmässig um $\frac{1}{520}$ Par. Lin. fortrückte.

Diese feine Beweglichkeit des Auges mag nun wohl darin begründet sein, dass die lichtpercipirende Schicht der Retina eine feine Mosaik von sensiblen Elementen darstellt, welche es mit sich bringt, dass der isolirte Erregungszustand eines jeden Elements (resp. Zapfens) durch die zugehörige Nervenfaser zum Gehirn geleitet, hier auf reflectorischem Wege eine Bewegung des Auges zu bewirken sucht, wie sie nöthig ist, um den auf das Element fallenden Lichtpunkt auf die empfindlichste Stelle der Retina zu führen.

395. Die bestimmten Umrisse einer Figur, die etwa auf einer sonst einfarbigen Fläche gegeben ist, können nur erkannt werden, wenn dieselben einen Farbenreiz bieten, der in irgend einem Gegensatze zu dem Farbenreize der Fläche steht. Die abstechende Farbe des Umrisses hält den auf der Fläche fortgleitenden Blick auf und nöthigt ihn, längs des Umrisses der Figur hinzugehen, wodurch diese erkannt wird. Theils wird aber auch der Blick, durch den Conflict zwischen den Farbenreizen des Umrisses und der Fläche, in das Innere der Figur zurückgetrieben, um hier einen Punkt zu suchen, von wo aus derselbe auf den bequemsten Wegen zu den verschiedenen Punkten des Umrisses gelangen kann. Ist dieser Punkt gefunden, so bildet er, als gemeinsamer Durchkreuzungspunkt aller von ihm und der Peripherie ausgehenden Reproductionen, für das Auge einen Ruhepunkt, der ihm gestattet, die verschiedenen Theile der Figur, falls diese nicht zu ausgedehnt

ist, in einem und demselben Vorstellen gleichzeitig und gleichmässig emporzuheben. Und hiermit ist denn auch die Auffassung der Gestalt vollendet. — Es ist aber hierbei nicht zu verkennen, dass Figuren verschiedener Art beträchtliche Unterschiede darbieten müssen. Leicht findet sich jener Ruhepunkt bei den regelmässigen Figuren, und unter ihnen am leichtesten beim Kreise, dessen Mittelpunkt von allen Peripheriepunkten gleich weit entfernt ist. Nach den regelmässigen Figuren, die durch Gleichheit der Seiten und Winkel charakterisirt sind, kommen diejenigen, welche bezüglich eines mittleren Punktes in symmetrische Abtheilungen zerfallen. Kreisförmige Gestaltungen gefallen wegen ihrer leichten Fasslichkeit, allein man gibt dem Kreise keineswegs den Vorzug vor der Ellipse, die zwar minder fasslich als jener, aber doch immerhin noch fasslich genug, dem Auge zugleich mehr Beschäftigung und Abwechselung bietet.

396. Jede Bewegung des Auges, die den Blick beim Beschauen einer Fläche in bestimmter Richtung vor- und rückwärts führt, bewirkt das Vorstellen einer Raumreihe (von bestimmter Länge), welche sich als eine gerade Linie bezeichnen lässt. Doch ist nicht anzunehmen, dass das Auge sich mit einer besonderen Leichtigkeit längs einer gegebenen geraden Linie fortbewege. Im Gegentheil wird ihm durch das längere Verfolgen einer geraden Linie, namentlich beim Gebrauche beider Augen, ein gewisser Zwang angethan*), der nicht so stattfindet, wenn der Blick an einer krummen Linie hingeht, welche seine Richtung beständig ändert und in die Drehung des Auges einen gewissen Wechsel bringt, zu dem das Organ wohl schon in Folge der gegenseitigen Stellung seiner Muskeln und vermöge der Ermüdung, die eine länger fortgesetzte Spannung bestimmter Muskeln mit sich bringt, disponirt ist. Indess muss hierbei viel auf die Art des Krummen, d. h. auf die Art und Weise ankommen, wie die Richtung des Blickes dadurch abgeändert wird. Plötzliche, unvermittelte Ablenkungen des Blicks, die wohl gar eine durch die vormalige Wahrnehmung bereits angeregte Erwartung des Fortganges täuschen, müssen störend wirken, und in diesem Sinne kann das Krumme, im Gegensatze zu dem Geraden, als Symbol des Falschen und Bösen gelten. Wie sehr auch die andauernde Verfolgung einer ge-

---

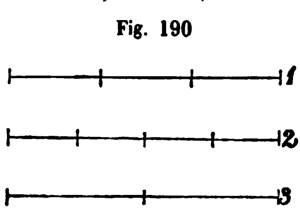
*) vergl. Lotze, med. Psych. S. 386.

raden Linie geniren mag, sie lässt doch noch eine gewisse Gliederung zu, die, öfter in derselben Weise wiederholt, allerdings auch sehr langweilig werden kann, aber doch keinenfalls zu jenen die Erwartung täuschenden Ablenkungen des Blicks führt, durch welche manche krumme Gestaltungen charakterisirt sind.

397. Bieten sich dem Auge mehrere Systeme von Linien in einem grösseren Ganzen dar, wie z. B. in den Werken der Baukunst, so entstehen eben so viele Systeme von Vorstellungsreihen, die sich in ihrem Ablaufen gegenseitig begünstigen oder hemmen können. Je nachdem nun das eine oder andere geschieht, wird man das Werk schön oder hässlich finden. So werden mehrere parallel laufende Horizontalen, wenn sie entsprechende symmetrische Abtheilungen bieten, sich gegenseitig im Vorstellen begünstigen.

Betrachten wir eine Horizontale (Fig. 190, Nr. 2 u. 3) die eine gerade Anzahl von Abtheilungen und demgemäss eine ungerade Anzahl von Abtheilungspunkten (oder vertikalen Strichen) enthält; so kann der Blick von dem mittleren Striche aus leicht nach beiden Seiten zu den anderen untereinander gleich weit entfernten Strichen gelangen, vorausgesetzt nur, dass die Horizontale dem Auge nicht zu nahe ist und daher keine zu grosse Drehungen desselben nöthig sind, um die seitlich gelegenen Striche in das Sehfeld einzuführen. Bei einer solchen Abtheilungsweise heben sich die seitlichen Striche bald allzumal und gleichmässig im Bewusstsein empor, während dies viel weniger bei einer geraden Anzahl von Abtheilungsstrichen (Nr. 1) gelingt. Das Auge vermisst hier den mittleren Symmetriepunkt und nur dadurch, dass man die Aufmerksamkeit auf die linearen Abtheilungen selbst richtet, findet rücksichtlich dieser ein ganz ähnlicher Vorgang wie zuvor in Bezug auf die Striche statt. Der Blick auf die mittlere Abtheilung hebt die seitlichen gleichmässig hervor.

Fig. 190



Nun ist es ja bekannt, dass man bei der Anordnung einzelner Gegenstände auf einer vertikalen Wand sehr häufig die ungerade Zahl walten lässt. So bietet auch gewöhnlich die Vorderseite eines Hauses eine ungerade Anzahl von Fenstern auf einer horizontalen Basis dar; und in der That ist hier eine gerade Anzahl nur dann nicht störend, wenn sie, wie in dem oben angeführten Beispiele,

die Wand selbst in eine ungerade Anzahl von Abtheilungen zerlegt, oder wenn die Fenster, was auch vorkommt, paarweise zusammen geordnet sind, so dass doch eine ungerade Anzahl von Fenstergruppen hervortritt, oder endlich, wenn bei sehr langen Reihen die Beziehung der entfernteren Glieder auf ein mittleres Glied überhaupt wegfällt.

398. Nach dem Vorstehenden ist der Mittelpunkt einer Linie für das Auge der Ort, von wo aus dieses am bequemsten die seitlichen Punkte erreichen und diese zu einem klaren Gesammtvorstellen bringen kann. Ist dieselbe nicht zu lang, so stellt sie sich in ihrer ganzen Ausdehnung mit Einschluss der Grenzpunkte in voller Klarheit dar, während der Blick auf ihrer Mitte ruht. Doch ist die Augenaxe dabei in einer gelinden Oscillation begriffen, indem sie abwechselnd nach der einen und anderen Seite hin von der Mitte ausweicht. Fixirt man aber die letztere absichtlich, so verlieren die Grenzpunkte der Linie, wenn deren Länge eine gewisse Grösse überschreitet, gar sehr an Deutlichkeit, weil sie dann bekanntlich zu weit seitlich von der empfindlichsten Stelle der Retina liegen.

Geht aber das Auge längs einer geraden Linie hin, von dem einen Endpunkte *a* nach dem andern *b*, so kommen alle ihre Punkte nacheinander auf die empfindlichste Stelle der Retina. Jeder folgende Eindruck schliesst sich an die vorhergehenden und reproducirt diese in abgestufter Klarheit, während dieselben auch zugleich von dem Grenzpunkte *a* aus, dessen Bild noch immer auf der Netzhaut verweilt, nacheinander zu höheren Klarheitsgraden reproducirt werden. Kurz, die bereits am empfindlichsten Orte vorbeigegangene Strecke *ax* ist im Vorstellen noch mit sinnlicher Klarheit gegenwärtig, während eine zweite Strecke *xy* der Linie *ab* durchlaufen wird. Je mehr indess *ax* auf die seitliche Region der Retina fällt, desto mehr verliert es an Klarheit und wird schliesslich nur noch im Vorstellen als eine Raumreihe von bestimmter Länge mehr oder minder bestimmt festgehalten. Abtheilungen einer geraden Linie werden aber als gleiche erkannt, wenn das Auge für jeden Theilungspunkt dieselbe Stellung einnehmend bei dem Durchlaufen der einzelnen Abtheilungen gleiche Muskelempfindungen erzeugt. Die gleiche Stellung des Auges für jeden Theilungspunkt erfordert jedoch bei öfterer Fortsetzung dieser messenden Operation im Verlaufe einer längeren Linie oder bei längeren Abschnitten,

die auf solche Weise geschätzt werden sollen, eine Bewegung des Kopfes oder auch des ganzen Körpers an der Linie vorüber, wenn wir nicht etwa umgekehrt die Linie an unserem Auge vorüber bewegen können *).

399. Die Art und Weise, wie eine gegebene Raumreihe von bestimmter Länge im Bewusstsein abläuft, muss auf die Beurtheilung ihrer Grösse Einfluss haben. Ihr Ablaufen kann durch besondere Umstände erschwert oder begünstigt werden, und je nachdem das eine oder andere geschieht, wird sie uns grösser oder kleiner erscheinen. So wird die Auffassung erschwert, wenn die anfänglich feingegliederte Reihe in einförmige, wüste Strecken verläuft, oder wenn ihre ersten Glieder bestimmte Erwartungen des Fortganges erregen, deren Lösung durch die folgenden verweigert wird. Eben so ist es, wenn den Augen beim Auffassen einer Raumreihe anfänglich ein Massstab aufgenöthigt wird, der sich beim weiteren Verfolg der Reihe als unzulänglich erweist. Je bestimmter dagegen während der Auffassung einer Raumreihe (oder auch eines Gewebes von Raumreihen) die Erwartungen hervortreten und je vollständiger und regelmässiger deren Lösung im weiteren Fortgange herbeigeführt wird, desto kleiner erscheint der Gegenstand in unserem Vorstellen. So gewähren gleichförmig wiederkehrende Absticke in der Gliederung, also strenge Symmetrie, und Beibehaltung des gewonnenen Grundmasses eine scheinbare Verkleinerung, wie sich dies an Werken der antiken Baukunst wohl wahrnehmen lässt **).

400. Auf die Beurtheilung der Grösse eines Gesichtsobjects von Belang ist ferner die Menge der an ihm unterscheidbaren Einzelheiten, und in dieser Beziehung pflegt man wohl zu sagen, dass ein umschlossener Raum, der dem Auge viel unterscheidbares Detail darbietet, grösser erscheine als unter sonst gleichen Umständen ein leerer. Vergleicht man zwei nebeneinander befindliche, in der Wirklichkeit gleich grosse Räume, die auf dieselbe Weise umschlossen sind, so muss das Auge in Rücksicht ihrer Begrenzung ohne Zweifel zu demselben Resultate kommen, d. h. beide Räume gleich gross finden. Gleichwohl macht sich im Vorstellen beider

*) Vergl. hierzu Lotze, medic. Psych. S. 389 ff.

**) s. hierüber W. F. Volkmann, Grundriss der Psychologie, etc. Halle 1856. S. 211 ff.

auch ein Unterschied bemerkbar, der gewiss nur durch den Gegensatz zwischen der Fülle des einen und der Leere des andern Raumes veranlasst wird. In diesem Sinne mag das gelten, was Lotze *) hervorhebt, indem er eine ästhetische von einer mathematischen Grössenschätzung unterscheidet. „Legt man eine leere Fläche und eine gleich grosse bezeichnete, carrirte oder gestreifte, nicht allzuweit nebeneinander, so empfinden wir sehr wohl, dass sie gleich gross sind; aber wir haben ein eigenthümliches Gefühl, als sei die bezeichnete für ihren Raum, d. h. also für den Raum, den sie nach unserer Empfindung wirklich einnimmt, zu gross. Was wir zu bemerken glauben, ist bei solcher Vergleichung nicht eine grössere Extension des erfüllten Raumes, sondern eine Art grösserer Dichtigkeit seiner Erfüllung, ganz entsprechend der grösseren Stärke der Erregung, die er uns verursacht.... Fehlt uns dagegen zur Vergleichung das Volle, so erscheint das gleich grosse Leere allerdings stets viel kleiner; ein unmöblirtes Zimmer viel zu klein, um die nöthigen Geräthe zu fassen, die unabgetheilte Aussenseite eines Hauses lange nicht hinreichend, um die Reihe von Gemächern bilden zu können, die sie einschliesst, etc." —

Einige andere Umstände, die auf die Grössenbeurtheilung Einfluss üben, haben ihren Grund in den dioptrischen Eigenthümlichkeiten des Auges, die wir (Abth. II. S. 293 ff., S. 300 ff.) ausführlicher besprochen haben. Hierher gehört der Einfluss der Irradiation (S. 312 ff.), so wie auch der Umstand, dass eine vertikale Linie meist länger erscheint als eine gleich lange horizontale, weshalb denn auch z. B. ein helles Rechteck (Oblongum) mit etwas längerer horizontalen Seite auf dunklem Grunde leicht als ein Quadrat, und umgekehrt ein helles Quadrat auf dunklem Grunde etwas verlängert erscheinen kann.

401. Zu unterscheiden von der Messung einer gegebenen Ausdehnung mittelst einer im Vorstellen festgehaltenen Raumstrecke, die in Folge häufiger Wiederholung ohne Mühe reproducirt und so in Gedanken festgehalten werden kann, ist die Bestimmung der verhältnissmässigen Länge zweier verschiedenen Linien, die man nacheinander erblickt. Im ersten Falle wird die betreffende Raumstrecke als Massstab, wie in der Wirklichkeit so auch in Gedanken, längs der auszumessenden Dimension gewissermassen fortge-

*) a. a. O. S. 393.

schoben, oder man theilt die letztere mittelst gleicher Muskelempfindungen in gleiche Abschnitte, die dem Massstabe an Grösse möglichst gleich kommen, während im zweiten Falle der Unterschied der miteinander zu vergleichenden Linien, wie es scheint, sich unmittelbar aus den Längen der ihnen entsprechenden Vorstellungsreihen ergibt. Man erkennt den Unterschied zweier Linien rücksichtlich ihrer Längen ohne alle Beziehung auf irgend einen schon voraus bestimmten Massstab; es ist einerlei, ob die beiden Linien, deren absolute Längen sich etwa wie 20:21 verhalten, 20 und 21 Zoll oder eben so viele Linien lang sind. Wir fassen hier also die Verhältnisse räumlicher Grössen auf, ohne dass wir die letzteren durch einen kleineren Massstab ausgemessen und ihren absoluten Unterschied dadurch kennen gelernt haben. So können nach E. H. Weber's *) Mittheilungen bei gutem Augenmasse noch zwei Linien hinsichtlich ihrer Länge unterschieden werden, von denen die eine um $\frac{1}{20}$ Linie länger als die andere ist. In gewisser Beziehung können wir nun wohl doch sagen, dass beide Linien sich aneinander messen, indem die eine, sei es nun die grössere oder kleinere, unmittelbar zum Masse für die andere dient. Was aber die eine Linie länger oder kürzer als die andere erscheinen lässt, ist eigentlich das Mehr oder Weniger der Reproduction, dessen wir inne werden, wenn sich der Blick von der einen Linie auf die andere richtet. Wendet sich der Blick zur zweiten Linie, so ist die erste noch mehr oder weniger bestimmt, je nach der Genauigkeit ihrer Auffassung, in Gedanken gegenwärtig. Nun läuft beim Wahrnehmen der zweiten Linie die ihr entsprechende Reihe associirter Licht- und Muskelempfindungen im Bewusstsein ab, welche sofort die zweite Linie im Vergleich zur ersten als eine längere oder kürzere darbietet, je nachdem diese Reihe länger oder kürzer als die für die erste Linie ist.

492. Die Entfernung zweier Punkte im Sehfelde ergibt sich schon durch die einfache Bewegung des Auges von einem dieser Punkte zum andern, um beide nacheinander auf die empfindlichste Stelle der Retina zu bringen. Wollen wir aber den gegenseitigen Abstand derselben seiner Grösse nach genauer bestimmen, so muss der Blick zwischen ihnen hin- und hergehen, wo dann, bei schicklicher Stellung des Auges, die von beiden Punkten widereinander

*) R. Wagner's Handw. der Physiologie, Bd. III. Abthl. 2. S. 560 f.

laufenden Reproductionen in der Seele zum Gleichgewichte gelangen und ein gleichzeitiges klares Vorstellen beider Punkte auch bei ruhendem Auge gestatten, falls die Distanz nicht bedeutend ist. Wir heben dies hier nochmals hervor, um damit die Bemerkung zu verbinden, dass wir eine solche hin- und hergehende Bewegung des Auges zum Erkennen des einfachen Abstandes zweier Punkte nicht mehr unter allen Umständen für nöthig erachten, sobald das Sehen und räumliche Vorstellen einen gewissen Grad der Ausbildung erreicht hat. Man wird dann auf Grund der bereits gewonnenen Erfahrungen den Abstand zweier nahe liegender Punkte oder Linien auch ohne jene Bewegung des Auges auffassen können, indem an die Erregung bestimmter Netzhautstellen sich, je nach ihrer Entfernung vom empfindlichsten Punkte, Reproductionen von bestimmter Länge knüpfen, die dann die Entfernung der betreffenden Punkte oder Linien in unserem Sehfelde bestimmen. Vermittelst der reproducirten Muskelempfindungen, welche die früheren Bewegungen des Auges erzeugten, sind wir uns gewissermassen der Grösse der Drehung bewusst, die wir mit dem Auge vornehmen müssen, um die Bilder zweier Punkte nacheinander auf die empfindlichste Stelle der Retina zu bringen. Und in diesem Sinne können wir auch sagen, dass sich an die Erregung eines bestimmten Netzhautpunktes allemal eine Bewegungstendenz knüpft, um das auf ihn fallende Bild nach jener Stelle hinzuführen.

403. Erinnern wir uns nun hier an den blinden Fleck der Retina (S. 401), so ergibt sich leicht, dass derselbe in Hinsicht auf unsere Distanzvorstellungen keinen Ausfall bewirken kann. Freilich verhält es sich in dem Falle, wo bei zwei gegebenen Punkten das Bild des einen gerade auf den genannten Fleck fällt, eben so als ob dieser Punkt nicht vorhanden wäre, da ja sein Bild keinen Erregungszustand, weder in der Retina noch in der Seele, veranlasst. Liegt dagegen, in Bezug auf die Mitte der Retina, das Bild des einen Punktes diesseits und das des andern jenseits des blinden Flecks, so wird, um das Bild des letzteren Punktes auf die empfindlichste Stelle zu führen, im Ganzen eine eben so grosse Drehung des Auges erforderlich sein, als wenn der blinde Fleck mit sensibeln Retinaelementen erfüllt wäre. Und so erzeugt sich auch, dem Betrage dieser Drehung gemäss, eine entsprechende Reihe von Muskelempfindungen. Daher wird denn auch eine gerade Linie, deren Bild durch den blinden Fleck dergestalt hindurch-

geht, dass es denselben beiderseits überragt (S. 404), unverkürzt erscheinen müssen. Die Länge dieser Linie kann wohl keinenfalls allein durch die Anzahl der erregten Netzhautpunkte bestimmt werden, was, wenn es so wäre, zu einer Verkürzung der Linie führen würde; es muss hier im Vorstellen noch ein anderes Moment wirksam sein, welches wahrscheinlicher Weise durch die Reihe der Muskelempfindungen bedingt ist, die entsteht, wenn das Auge sich so bewegt, dass sämmtliche Punkte der Linie nacheinander an der empfindlichsten Stelle der Retina vorübergeführt werden. Und diese Reihe kann auch bei ruhendem Auge reproducirt werden, wenn das Bild einer Linie auf die bezeichnete Weise durch den blinden Fleck hindurchgeht, wo dann die Endpunkte des Bildes, welche auf sensible Retinaelemente fallen, die Grösse der Reproduction und somit auch die Länge der Linie im Vorstellen bestimmen. In diesem Sinne können wir nun allenfalls sagen, dass die Seele ein Bewusstsein habe von dem Abstande der sensiblen Retinapunkte, welche den blinden Fleck umgeben. Die Farbe aber, worin uns der auf den blinden Fleck fallende Theil der Linie erscheint, ist ohne Zweifel durch die Erregungszustände (resp. Lichtempfindungen) bedingt, welche von den anderen Theilen derselben Linie herrühren. — Das Vorstehende bezieht sich auf den blinden Fleck Eines Auges. Beim Gebrauch beider Augen treten die bereits früher (S. 407 ff.) mitgetheilten Bestimmungen ein.

404. Hat also das Sehen und räumliche Vorstellen eine gewisse Ausbildung erreicht, so existiren schon unzählige Raumreihen, die durch zahllose frühere Drehungen des Auges nach allen möglichen Richtungen und innerhalb der verschiedensten Grenzen erzeugt wurden. Indem nun die Erregungszustände je zweier differenter Netzhautpunkte sofort Raumreihen von bestimmter Länge reproduciren, wird es der Seele möglich, gewisse Distanzen zweier Punkte oder Linien auch ohne Beihilfe von Augenbewegungen wahrzunehmen.

So kann man denn auch sehr kleine Linien, die dicht beieinander liegen, in ihrem Verhältnisse durch den ruhenden Blick auffassen. Allein die gewöhnlichen hierauf bezüglichen Experimente führen leicht zu einem getrübten Resultate, denn ein einziges Hinübergleiten des Blickes von der einen Linie zur anderen ist schon genügend, um das Verhältniss beider herauszustellen, das dann auch bei ruhendem Blicke bestehen bleibt. Häufig ge-

nug wird es aber geschehen, dass bereits vor der völligen Feststellung des Blickes eine bei weitem grössere Anzahl von Augenbewegungen vollzogen ist, als bei einiger Uebung zu dem bezeichneten Zweck nöthig erscheint. Wenn nun auch das Verhältniss beider Längen dem ruhigen Blick Stand hält, so ist es doch fraglich, ob nicht vorausgegangene gelinde Augenbewegungen das geleistet haben, was man als ein Werk des ruhenden Blickes betrachten möchte. Indessen kann man sich bei einiger Vorsicht doch einigermassen überzeugen, dass auch der ruhende Blick, ohne vorgängige Bewegung des Auges, solche kleine Längen in ihrem Verhältnisse aufzufassen vermag.

404. Ob wir aber auch ursprünglich, vor aller Bewegung der Augen, Distanzen irgend welcher Art und selbst Gestalten von geringer Ausdehnung wahrnehmen können, ist sehr zweifelhaft. Die Erfahrung bezeugt wenigstens die fast unaufhörliche Regsamkeit des Blickes bei der Auffassung neuer, selbst kleiner Gestalten. Dazu kommen noch die bestimmten Erfahrungen, die man an glücklich geheilten Blindgeborenen gemacht hat*). Einer derselben, von Dr. Franz operirt, konnte anfänglich nicht die Kugel von einer Scheibe und den Würfel vom Quadrate unterscheiden. Es fehlte ihm also noch die gehörige Vorstellung der Tiefendimension, die nach unseren früheren Betrachtungen erst durch den Accommodationsprocess und die veränderliche Sehaxenconvergenz der Augen gewonnen wird. Der Operirte musste sein Auge erst der verschiedenen Entfernung der gesehenen Punkte anpassen und beim Gebrauche beider Augen die Convergenz ihrer Axen dergestalt abändern lernen, dass die nach der Richtung der Tiefe hin gelegenen Punkte eines Körpers in rascher Succession zur deutlichen Wahrnehmung gelangen und sich zu einem Totalbilde zusammenfügen konnten. Und wie die Vorstellung der Tiefendimension eines Körpers, so resultirt auch die Vorstellung der Entfernung eines Gesichtsobjectes von uns erst allmälig aus jenen Empfindungen, welche die Veränderungen der Accommodation und Sehaxenconvergenz der Augen begleiten (S. 521 ff.). So konnte auch ein anderer Blindgeborener, 13 Jahre alt und von dem englischen

*) Philos. Transact. 1728. Vol. XXXV. p. 447; — Smith's Optik, übers. von Kästner, S. 40 ff. Philos. Transact. 1826. T. III. p. 529, ebenda 1841. p. 66. — Giornale dell' J. R. Istituto Lombardo di scienze lettere ed arti. Tomo XVI. Milano 1847. p. 56.

Wundarzte Chesselden operirt, die Entfernungen Anfangs nur sehr wenig beurtheilen.

Aehnliches wie von der Tiefendimension können wir nun auch von der Auffassung der Gestalten in einer Ebene behaupten, nämlich dass auch hier erst durch eine Reihe successiver Wahrnehmungen während des Hin- und Hergleitens des Blickes, also kurz in Folge von Augenbewegungen die Vorstellung einer bestimmten Gestalt gewonnen werde. Der von Dr. Franz Operirte erkannte nur gewisse einfache Formen, wie Viereck und Kreis, ohne vorläufige Betastung, aber doch nicht unmittelbar, sondern erst, wie es heisst, durch einiges Nachdenken, wobei er nach seiner eigenen Angabe von einem Gefühl in den Fingerspitzen geleitet wurde. Und hier findet sich allerdings die bereits anerkannte Möglichkeit, dass ein sehend gewordener Blindgeborner, vermöge der Aehnlichkeit zwischen den Reihen der Muskelempfindungen beim Umtasten der Gestalt mit dem Finger und beim Umschreiben derselben mit dem Blicke, in dem Gesichtsbilde eines Körpers alsbald das schon bekannte Tastbild desselben wiedererkennt.

Chesselden's Operirter konnte anfänglich kein Object von dem andern unterscheiden, mochte dasselbe auch noch so verschiedene Gestalt und Grösse haben. Gemälde sah er zunächst nur als buntscheckige Flächen, und erst nach zwei Monaten eröffnete sich ihm ein Verständniss derselben. Nun mag wohl die anfängliche Verworrenheit des Sehens zum Theil von der mangelhaften Accommodation des Auges herrühren, die noch keine scharfen Retinabilder gestattet; doch möchte hierauf allein die im Anfang mangelnde Unterscheidung verschiedener Gestalten keineswegs zurückführbar sein. Gemälde mussten aber jenem Operirten sofort als buntscheckig erscheinen, da die verschiedenen Farbenempfindungen, die sie verursachten, nicht zu einem intensiven Eins verschmelzen konnten. Auch konnte derselbe sehr bald zum Flächensehen gelangen; denn nach unseren früheren Betrachtungen genügen hierzu schon wenige Bewegungen des Auges um seine verschiedenen Drehaxen. Und wenn auch das Auge des Operirten beim Beginn seiner Sehthätigkeit völlig bewegungslos gewesen wäre, so hätte doch schon die Bewegung des Kopfes allenfalls zu einem Flächensehen führen können. Gewiss besass aber das Auge schon gleich anfänglich eine nicht unbeträchtliche Beweglichkeit, und nur das feinere Spiel der Accommodation und Sehaxenconvergenz stellte

sich erst später ein; daher denn der Operirte die Entfernungen der Gesichtsobjecte anfänglich nur sehr unsicher zu beurtheilen wusste. Dasselbe hat man auch noch an vielen andern Blindgeborenen und dann sehend Gemachten beobachtet, wenn schon nicht in dem Grade, wie es Chesselden von seinem Operirten erzählt, der sich eingebildet habe, alle Sachen, die er sähe, berührten seine Augen, wie das was er fühlte seine Haut. Jedenfalls folgt aber aus den Beobachtungen, die man an vielen glücklich operirten Blindgeborenen gewonnen hat, so viel, dass das Sehen, nämlich das Auffassen bestimmter Gestalten im Raume, die Beurtheilung der Grössen und Entfernungen, die gegenseitige Lage der Gesichtsobjecte sich nicht in der frühesten Kindheit, so zu sagen, mit einem Schlage macht, sondern dass dies Alles erst, wenn auch in einer verhältnissmässig kurzen Zeit, wirklich erlernt wird. Bemerkenswerth ist übrigens noch, dass keiner der bis jetzt operirten Blindgeborenen durchaus blind war. Dieselben konnten das Helle vom Dunklen und viele unter ihnen auch verschiedene Farben, wie Roth, Blau und Gelb, unterscheiden. Es gehören hierher alle diejenigen Blindgebornen, welche am grauen Staar leiden. Und von ihnen gibt man an*), dass sie ihre Augen sehr viel und in beträchtlichem Grade bewegen, sie nach dem Hellen oder Dunklen in allen möglichen Richtungen drehen, und die Bewegung des Schattens ihrer eigenen vor den Augen bewegten Hand sehen können. Unter solchen Umständen müssen dieselben freilich im Bereiche des Gesichtssinnes mancherlei Erfahrungen gewinnen, die sich bei späterer Erlangung der vollen Sehkraft auch alsbald wirksam erweisen werden. Und gewiss müssen hier auch die Erfahrungen, welche diese Blinden bereits durch ihren Tast- und Muskelsinn, sowie durch ihre Bewegungen im Raume erworben haben, sofort einen fördernden Einfluss auf die weitere Ausbildung des Sehens üben. Denkt man sich nun ein Kind, dem die meisten dieser Erfahrungen noch mangeln, so wird man ihm kaum eine Kenntniss der Tiefendimension zuschreiben können. Die ersten Drehbewegungen seines Auges können nur zum einfachsten Flächensehen führen und alle Gesichtsobjecte werden sich dem Kinde zunächst in einer und derselben Ebene darzustellen scheinen.

---

*) E. H. Weber in den Ber. d. königl. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. in Leipzig, 1852. S. 132.

406. Es lässt sich nun immerhin noch fragen, ob ein der freien Bewegung völlig unfähiges und auch sonst unverrückt gehaltenes Auge zu einem flächenartigen Sehen führen kann, wenn ihm eine einfarbige Fläche dargeboten wird. Die Möglichkeit hiervon wollen wir nicht bestreiten. Vielleicht könnte man mit Th. Waitz*) sagen, dass das deutlich Gesehene mit dem undeutlich Gesehenen nicht völlig verschmelzen könne. Da nämlich die empfindlichste Stelle der Retina auf die Mitte des gelben Flecks beschränkt ist und die Schärfe des Sehens überall nach den seitlichen Theilen hin abnimmt, so wird sich beim Hinstarren des Auges auf eine Fläche um einen scharf gesehenen Mittelpunkt eine Menge minder scharfer Lichteindrücke in abgestuften Klarheitsgraden gruppiren, so dass nun die Seele den ganzen Complex dieser Lichtempfindungen vielleicht als ein Flächengebilde vorstellt. Die weitere Ausbildung und Vollendung des Sehens würde dann immer noch auf die früher angegebene Weise mittelst der Bewegungen des Auges herbeigeführt werden müssen.

407. Lotze**), der zwar die Wichtigkeit der Augenbewegungen für die Ausbildung des Sehens keineswegs verkennt, aber denselben mehr eine secundäre Bedeutung zugesteht, denkt sich, um die Entstehung des Sehfeldes bei ruhendem Auge zu erklären, an die Lichtaffection jedes einzelnen Netzhautpunktes eine gewisse locale Nebenbestimmung geknüpft, die es verhindert, dass sie mit den gleichzeitigen homogenen Lichtreizen, wegen der Einfachheit der Seele, zu einer einzigen intensiven Empfindung verschmilzt. „Wenn ein räumlich geordnetes System von Reizen auf die Seele wirkt, so wird sie davon unmittelbar nur eine Summe unräumlicher und intensiver Erregungen erfahren, und genöthigt sein, sie in eine geometrische Anordnung wieder auszubreiten, und überall kann sie dies nur vermöge der qualitativen Nebenbestimmungen, welche jeden Eindruck um seines localen Entstehungspunktes in dem Nerven willen begleiten. Man müsste deshalb voraussetzen, dass auch jede Netzhautstelle, indem sie gereizt wird, der Seele zwei innere Zustände zugleich verursache, einmal jenen, von dem die Qualität der Farbe, daneben aber den andern, von dem die relative Lage des zu empfindenden Farbenpunktes abhängt, und der

*) Psychologie als Naturwissenschaft. Braunsch. 1849. S. 166 ff.

**) Medicinische Psychologie, Leipzig 1852. S. 325. 353 ff.

selbst abhängig ist von der relativen Lage dieser Netzhautstelle unter ihren Nachbarn." — Die localen Nebenbestimmungen nun, die sich an die Affection jeder Netzhautstelle knüpfen und das Zusammenfallen der Empfindungen in Eins hindern, bilden, wie Lotze sagt, ein so gegliedertes System, dass durch sie die Empfindungen in abgestufte Unterschiede und Verwandtschaften geordnet werden, die unabhängig von ihrer Qualität, sich in der räumlichen Anschauung als gleich abgestufte Entfernungsgrössen der Empfindungspunkte voneinander und als relative Lagen derselben geltend machen. Die Herstellung dieser Localzeichen denkt er sich aber durch ein System von Bewegungen ausgeführt.

Bekanntlich pflegt*) die Abbildung eines glänzenden Punktes auf einem der seitlichen Theile der Netzhaut sofort eine Bewegung des Auges hervorzubringen, durch welche sein Bild auf die Stelle des deutlichsten Sehens gebracht wird. Aber ein Bild, das auf einen seitlichen Netzhautpunkt *a* fällt, bedarf einer andern Combination, Richtung und Grösse der Augenbewegung, um auf die empfindlichste Stelle *v* zu gelangen, als ein Bild, das auf irgend einen andern Netzhautpunkt *b* oder *c* fällt. Liegen nun drei verschiedene Netzhautpunkte *a, b, c* nebst dem Punkte *v* des deutlichsten Sehens in einem und demselben auf der Netzhaut beschriebenen Kreisbogen, so sind die Strecken dieses Bogens *va, vb, vc* verschieden gross, und da das Auge sie durchlaufen muss, um bezüglich die Bilder von *a, b, c* in die Richtung des deutlichsten Sehens zu bringen, so werden hierzu auch verschiedene Grössen übrigens analoger Muskelbewegungen nöthig sein. Liegen hingegen *a, b, c* in der Peripherie eines und desselben Kreises, dessen Mittelpunkt *v* ist, so sind zwar *va, vb, vc* gleich gross, aber sie liegen, in Bezug auf *v*, nach verschiedenen Richtungen auf der Netzhaut; und daher sind denn auch, um die Bilder von *a, b, c* nach *v* zu bringen, Drehungen des Auges nach verschiedenen Richtungen nöthig, die theils durch verschiedene Muskeln, zum Theil aber wenigstens durch ein verschieden gestaltetes Zusammenwirken derselben Muskeln ausgeführt werden. Bezeichnet *s* die Summe aller dieser Bewegungen, so ist sie für jeden Punkt der Netzhaut eine unvertauschbare und specifische Combination, und eben deshalb glaubt Lotze an ihr das Localzeichen zu besitzen, welches die Erregung

*) Lotze a. a. O. S. 355 f.

jedes dieser Punkte von der jedes andern unterscheidet. Die Reizung jeder Netzhautstelle wird aber nach dem Princip der Reflexbewegung auf die verschiedenen Fasern der motorischen Nerven so übertragen, dass für jede eine besondere und unvertauschbare Bewegungsgruppe entsteht.

408. Wenn nun, sagt Lotze*) weiter, in dem Falle, dass das Bild in *a* durch grössere physische Helligkeit oder durch seinen Werth für das Bewusstsein die Aufmerksamkeit überwiegend auf sich zieht, jener Trieb zu einer wirklichen Bewegung des Auges führt, so könne man voraussetzen, dass auch da, wo ein solches Ueberwiegen eines einzelnen Eindrucks nicht stattfinde, doch jede Erregung der Netzhaut beständig einen solchen ihrer Localität entsprechenden Bewegungstrieb ausübe. Und man könne ferner annehmen, dass dieser Trieb zwar zunächst nur darauf gerichtet sei, automatisch jene Drehungen des Auges zu bewirken, dass er aber zugleich doch auch eine Veränderung in dem Zustande der Seele, einen Eindruck überhaupt in ihr vermittele; und diese Eindrücke sind es, wie Lotze meint, nach deren graduell genau bestimmten und abgestuften Verwandtschaften die Seele die empfundenen Farbenpunkte im Raume so auseinander breitet, dass ihre Entfernungen im Sehfelde und ihre ganze relative Lage den Entfernungen und Lagen der gereizten Nervenpunkte entsprechen. Es sei aber nicht nöthig, zu verlangen, dass diese Eindrücke sich auch zu bewussten Vorstellungen gestalten, um von ihnen diese Mitwirkung zur räumlichen Anschauung der empfundenen farbigen Punkte zu erwarten. Obgleich in einzelnen Fällen, wo es sich um weitere Lagenverhältnisse bereits durch das Sehen wahrgenommener Theile handele, eine bewusste Folgerung aus den Bewegungen der Augen gezogen werde, so müsse man doch die erste Localisation der farbigen Punkte, aus denen das Sehfeld erst construirt werden soll, als eine unbewusst sich vollziehende Thätigkeit der Seele ansehen. Nicht die wirklichen Bewegungen, noch bewusste Empfindungen derselben sind es, auf welche Lotze die Ordnung der Punkte im Sehfelde zurückführt; die beobachtbare Thatsache der unwillkürlichen Drehungen der Augenaxe sieht er vielmehr nur eine Erscheinung an, aus der man darauf zurückschliessen dass auch die unvollkommen bewusst geschehende er

*) s. a. a. O. S. 357 f.

sation der Empfindungselemente auf demselben Zusammenhange zwischen sensiblen und motorischen Nerven beruht, und dass Erregungen der letzteren an ihren centralen Endigungen es sind, welche jedem Farbeneindrucke seinen eigenen Localcharakter geben.

409. Lotze vermuthet*), dass diese seine Hypothese Vielen zu künstlich erscheinen werde. Indessen glaube ich nicht, dass man auf diesen Umstand ein ernstliches Bedenken gegen dieselbe stützen kann; wohl aber entsteht die Frage, ob nicht bei unbewegtem Auge aus allen jenen Bewegungstendenzen für die Seele doch nur ein einziger Eindruck resultirt, der eben der bestimmten Stellung des ruhenden Auges entspricht, und ob die Seele überhaupt durch die Bewegungstendenz, welche aus der Uebertragung des Reizes einer Netzhautstelle auf die Fasern der motorischen Augennerven hervorgeht, einen bestimmten Eindruck empfangen kann, falls diese Tendenz keinen Erfolg hat, d. h. keine wirkliche Contraction der betreffenden Augenmuskeln bewirkt. Wenn dagegen das Auge durch das Uebergewicht eines seitlichen Reizes oder aus irgend einem andern Grunde auf reflectorische Weise in Bewegung geräth, so wird die Seele in Folge der wirklichen Thätigkeit der Augenmuskeln eine Reihe von Eindrücken gewinnen, die sich mit den gleichzeitigen Lichtempfindungen associiren müssen. Allein jene Eindrücke, d. h. die Muskelempfindungen von Seiten des bewegten Auges, brauchen und werden sich beim Kinde keineswegs sofort zu bewussten Vorstellungen gestalten; sie können, auch wenn man sich ihrer nicht bewusst ist, doch als innere Zustände der Seele, in der früher von uns aufgezeigten Weise, wirksam sein, und auch wir müssen behaupten, dass die erste Localisation der farbigen Punkte eine unbewusst sich vollziehende Thätigkeit der Seele ist. Sind nun bereits Drehungen des Auges nach allen möglichen Richtungen erfolgt, so wird die Reizung jeder bestimmten Netzhautstelle nicht allein eine besondere Bewegungstendenz mit sich führen, sondern auch die Reproduction einer bestimmten Reihe von Muskelempfindungen veranlassen, durch welche die Lage des gesehenen Punktes im Sehfelde festgestellt wird. Es bedarf aber wohl immerhin noch einer weiteren Untersuchung, um die Frage vollends zu entscheiden, ob die von Lotze hervorgehobenen Localzeichen schon bei völlig unbewegtem Auge

*) a. a. O. S. 360 f.

entstehen oder erst durch ein System **wirklich** ausgeführter Bewegungen hervortreten können.

Bemerken müssen wir noch, dass nach Lotze jene Lokalzeichen nicht etwa der Seele, die an sich weder Neigung noch Fähigkeit zu räumlicher Anschauung hätte, beide einflössen sollen; sondern sie sollen ihr, die ihrer Natur gemäss zu räumlicher Entfaltung ihres intensiven Inhaltes drängt, Mittel sein, diese ihre allgemeine Vorstellungsweise in Uebereinstimmung mit der Natur und den gegenseitigen Verhältnissen der Gegenstände anzuwenden. „Sind einmal alle geometrischen Verhältnisse, welche zwischen den Theilen der äusseren Reize und noch zwischen den ihnen entsprechenden Eindrücken im Nerven bestanden, in dem blossen intensiven Dasein verschwunden, welches den Vorstellungen in der Seele allein zukommt, und sollen sie aus diesem reconstruirt werden, so müssen an den einzelnen Empfindungen intensive Merkzeichen angebracht sein, welche die Lage ihrer Objecte im Raume vertreten, und aus welchen die Seele die räumliche Ordnung wiederherstellen kann. Hierzu allein sollen jene Localzeichen dienen." Aber es ist nach Lotze noch ein **besonderer Zug** in der Natur der Seele nöthig, um sie zu der räumlichen Form ihrer Auffassung zu befähigen. „Denn es kann kein noch so fein gegliedertes und organisirtes System von Beziehungen zwischen den doch stets intensiven Eindrücken der Reize geben, welches durch sich selbst dazu aufforderte, als System **räumlicher Beziehungen** angeschaut zu werden, und das nicht ganz ebenso gut fortfahren könnte, als System **unräumlicher Verhältnisse** der Verwandtschaft und des Gegensatzes gleich den abgestuften Harmonien und Disharmonien der Töne empfunden zu werden, wenn nicht eben in der Seele selbst ein Grund läge, mehr zu thun, und das, was nur Beziehung **überhaupt** ist, als **räumliche Beziehung** aufzufassen."

410. Im Gegensatze hierzu hegen wir nun die Ueberzeugung, dass die Seele ohne Weiteres ein System innerer Zustände von der früher bezeichneten Art nicht anders denn in räumlicher Weise auffassen kann. Eben darum, weil die Seele ein einfaches Wesen, ist sie befähigt und genöthigt, eine Mehrheit homogener Farbenempfindungen in der Form des continuirlichen Nebeneinander vorzustellen, wenn diese Empfindungen wegen ihrer Association mit einem

System von qualitativen Nebenbestimmungen nicht zu einem intensiven Eins verschmelzen können, sondern in der Seele zu gleichmässiger Klarheit emporgehoben gewissermassen auseinander streben. Für das Gehörorgan gibt es freilich kein Mittel, vermöge dessen eine Mehrheit qualitativ gleicher Tonempfindungen von der Seele simultan in der Form eines continuirlichen Nebeneinander vorgestellt werden könnte. Es fehlt hier jenes vollständige System von Reproductionen, welches wir früher bei Ableitung des räumlichen Vorstellens kennen gelernt haben, und wodurch es der Seele möglich wird, eine Vielheit qualitativ gleicher Farbenempfindungen dergestalt vorzustellen, dass sie innerhalb gewisser Grenzen dem Bewusstsein in gleichmässiger Klarheit und in einer bestimmten Ordnung des Zwischen- und Nebeneinander vorschweben. Dieses System von Reproductionen kann auch nicht als ein System von Verhältnissen der Verwandtschaft und des Gegensatzes gleich den abgestuften Harmonien und Disharmonien der Töne empfunden werden. Was von demselben vornehmlich ins Bewusstsein fällt, ist sein Resultat, nämlich das gleichzeitig klare Vorstellen der vielen homogenen Farbenempfindungen in ihrem bestimmten Zwischeneinander, während die mit ihnen associirten verschiedenen Muskelempfindungen, durch welche sie auseinander gehalten werden, sich auf Grund ihres Gegensatzes dergestalt verdunkeln, dass ihnen kein bestimmt ausgesprochenes Quale entspricht. Wenn aber mehrere qualitativ verschiedene Töne gleichzeitig gegeben werden, so verschmelzen und hemmen sich diese als intensive Zustände lediglich nach ihrem qualitativen Charakter, oder wirken so aufeinander, wie es die Folge der einzelnen Impulse, gemäss der Schwingungszahl der einzelnen Töne, mit sich bringt. Auch hier gibt es kein System von Reproductionen, welches die einzelnen Töne simultan in gleichmässiger Klarheit und in einer bestimmten Ordnung des Zwischeneinander ins Bewusstsein bringen könnte. Und weil in Ermangelung eines solchen Systems, wie wir bereits bemerkten, eine Mehrheit qualitativ gleicher Tonempfindungen nicht die Vorstellung eines continuirlichen Nebeneinander gewähren kann, so werden auch mehrere qualitativ verschiedene Tonempfindungen, wenn sie gleichzeitig in der Seele auftreten, den Charakter rein intensiver Zustände in gegenseitiger Durchdringung behaupten. Hier gibt es wohl gewisse Verhältnisse der Verwandtschaft und des Gegensatzes, deren wir inne werden, und die in einigermassen ähnlicher Weise

auch bei qualitativ verschiedenen Farbenempfindungen, abgesehen von ihrer räumlichen Entfaltung, vorkommen mögen.

Kaum aber ist es möglich, sich von einer ursprünglichen Fähigkeit oder Geneigtheit der Seele zum räumlichen Vorstellen irgend einen klaren Begriff zu bilden. Die Raumanschauung, die man als ein der Natur der Seele ursprünglich und a priori angehöriges Besitzthum betrachten möchte, wird doch wohl, als eine gewisse allgemeine Vorstellungsweise, ein Zustand der Seele sein, der nun entweder als schlechthin einfach oder als irgend ein System von irgend welchen intensiven inneren Zuständen zu betrachten ist. Und alle Schwierigkeiten, die man darin finden kann, dass die Seele ein System von gegebenen intensiven Eindrücken in räumlicher Weise vorstellen soll, kommen bei einer solchen Annahme von Neuem zu Tage. Es gibt nun einmal in der Seele keine anderen als intensive Zustände; und wenn man bekennt, dass die aufgezeigte Bedingung des räumlichen Vorstellens, wenn schon eine nothwendige, doch nicht die einzige sei, so wird man, wie ich glaube, die anderen Bedingungen doch in der Eigenthümlichkeit gewisser Systeme von inneren Zuständen, und nicht in einer ursprünglichen Fähigkeit der Seele suchen müssen.

411. Um das erste rohe Flächensehen bei ruhendem Auge zu erklären, möchte wohl die Annahme am einfachsten erscheinen, dass jede Opticusfaser vermöge ihrer peripherischen oder centralen Endigungsweise dem von ihr geleiteten Lichtreize noch eine gewisse qualitative Nebenbestimmung gebe, wodurch das Zusammenfallen mehrerer gleichzeitiger homogenen Lichtreize in der Seele verhindert werde. Dann könnten die Erregungen zweier identischen Netzhautstellen beider Augen dieselbe qualitative Nebenbestimmung mit sich führen und daher auch die Bilder eines Gegenstandes, falls sie in beiden Augen auf identische Netzhautstellen fallen, diesen Gegenstand einfach erscheinen lassen, während wir ihn doppelt sehen würden, wenn seine Bilder auf differente Orte beider Netzhäute fielen und also mit ungleichen qualitativen Nebenbestimmungen behaftet wären. Indessen ist es sehr fraglich, ob die Annahme einer solchen Verschiedenheit zwischen den einzelnen Netzhautstellen oder zwischen den centralen Endigungen der einzelnen Opticusfasern statthaft ist. — Doch lässt sich die Lehre von den identischen Netzhautstellen in Bezug auf das Einfach- und Doppeltsehen auch noch in einem andern Sinne deuten. Nach unserer

Ansicht sind es nämlich die Muskelempfindungen, welche die räumlichen Beziehungen der Punkte im Sehfeld bestimmen. Identische Netzhautstellen sind nun eben solche, deren Erregungen in beiden Augen dieselben Systeme von Muskelempfindungen reproduciren, so dass denn auch die beiden Augen entsprechenden Complexe von Lichtempfindungen dieselben räumlichen Beziehungen gewinnen müssen. Allenfalls können wir dies auch mit W. F. Volkmann *) etwa in folgender Weise ausdrücken. Jeder Stellung des Auges entspricht, wenn dieses auf ein Object gerichtet ist, eine bestimmte Muskelempfindung α, die sich mit der Gesichtsvorstellung a des Objects associirt. Besteht nun dieselbe Complication von a und α auch für das andere Auge, was eben der Fall sein mag, wenn die Bilder eines Objectpunktes auf identischen Orten beider Netzhäute liegen, so wird das Object auch in unserem Vorstellen als ein einfaches erscheinen, dessen Ort im Sehfelde eben durch das beiden Augen gemeinsame α bestimmt ist. Wenn hingegen bei gewissen Stellungen beider Augen die Gesichtsvorstellung bezüglich des einen Auges mit der Muskelempfindung α und bezüglich des zweiten mit einer anderen β associirt ist, so erhält auch a in Rücksicht seiner Stellung im Sehfelde eine doppelte Beziehung, d. h. es wird doppelt gesehen.

412. Indem wir nun, was die Auffassung der Tiefendimension durch den Gesichtssinn betrifft, hier ausdrücklich auf unsere Auseinandersetzung im ersten Kapitel dieser Abtheilung (S. 517 ff.) verweisen, wenden wir uns insbesondere zu den räumlichen Auffassungen durch den Tast- und Muskelsinn, deren wir schon öfter gedacht haben.

Der auf der Oberfläche des Leibes verbreitete Tastsinn hat seinen peripherischen Sitz in einer Haut (Lederhaut), die aus innig verflochtenen Fasern und Faserbündeln besteht, nach aussen hin von der unempfindlichen Oberhaut bedeckt und nach innen durch Zellgewebe mit den darunterliegenden Körpertheilen verbunden ist. Diese Haut setzt sich in die Eingänge der Körperhöhlen fort, wo sie, bei allmäligem Dünnerwerden der Oberhaut, von einer schleimigen Flüssigkeit überzogen ist und Schleimhaut genannt wird. Die Lederhaut zeigt nun an ihrer äusseren Fläche eine sehr grosse Menge von Erhabenheiten und Vertiefungen, welche zum grossen

*) Grundriss der Psychologie, etc. S. 196 f.

Theil von den sog. Tastwärzchen gebildet werden, die als kegelförmige Hervorragungen (etwa $\frac{1}{80}$ — $\frac{1}{10}$, auf der Zunge $\frac{1}{2}$ — $\frac{3}{4}$''' lang) erscheinen und auf der inneren Fläche der Hand und Finger in regelmässigen Reihen vorkommen. Man nimmt ihrer in der Hohlhand 150 bis 200 auf dem Raume einer Quadratlinie an. In diesen Wärzchen verbreiten sich nun die aus dem Gehirn kommenden sensiblen Hautnerven, und zwar zumeist in solchen, welche keine Blutgefässe enthalten. Die Primitivfasern der Tastnerven verlaufen aber nach R. Wagner bogenförmig im Unterhautzellgewebe, wo sie sich theilen und Aeste senkrecht aufwärts zu den Tastwärzchen senden. Hier theilen sich die senkrechten Aestchen nochmals, um in die ei- oder tannenzapfenförmigen Tastkörperchen einzutreten, die in jedem kegelförmigen Tastwärzchen, längs seiner Axe, vorkommen. Im Innern dieser Tastkörperchen scheinen die eingetretenen Nervenästchen, gewissermassen büschelförmig, zu verlaufen.

413. Zwei Tastempfindungen, die an zwei verschiedenen Stellen unseres Leibes erregt werden, vermögen wir bekanntlich als zwei getrennte zu unterscheiden. Doch geschieht dies nicht unter allen Umständen. Wenn man die etwas abgeschliffenen oder mit Siegellack überzogenen Spitzen eines bis zu einem gewissen Grade geöffneten Zirkels auf zwei Punkte der Hautfläche gleichzeitig aufsetzt, so hat man zwei Tastempfindungen, falls der Abstand beider Zirkelspitzen nicht unterhalb einer gewissen Grenze liegt; sonst werden beide Berührungen nur als eine empfunden. Auf der Zungenspitze empfindet man die beiden Berührungen noch als gesonderte, wenn auch die Entfernung der Zirkelspitzen nur $\frac{1}{2}$ bis 1 Par. Linie beträgt. Auf der unteren Fläche des letzten Fingergliedes müssen beide Spitzen zu demselben Behufe wenigstens eine Linie, auf dem Handrücken 14 Linien, auf dem unteren Theile der Stirn zehn, auf dem Unterarm 18, an der Mitte des Oberarms der Quere nach 16 bis 18, der Länge nach 30''', und auf dem Rückgrate 24 bis 30 Linien voneinander abstehen. Das in Rede stehende Unterscheidungsvermögen ist also an verschiedenen Orten der Körperoberfläche sehr verschieden*).

*) s. die Tabellen bei E. H. Weber, Art. Tastsinn und Gemeingefühl in R. Wagner's Handw. der Physiologie, Bd. III. Abth. 2. S. 538 f.; — und Berichte der Sächs. Ges. der Wissensch. in Leipzig. 1852. S. 90.

Czermak*) stellte hierüber Versuche in der Art an, dass er die beiden Zirkelspitzen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander aufsetzte, so dass sich die eine von der Haut entfernte, während die andere niedergedrückt wurde. In diesem Falle ist dann die erste Berührung, wann die zweite eintritt, nur noch in der Erinnerung vorhanden. Auf solche Weise ergab sich ein feineres Unterscheidungsvermögen, und es fand sich z. B., dass auf der Mitte des Vorderarmes in seiner Längsrichtung, wo zwei Zirkelspitzen zur Erzeugung einer deutlichen Doppelempfindung 10,5 Millimeter entfernt sein müssen, schon eine Entfernung von 2,6^{mm} genügt, um die nacheinander bewirkten Berührungen als räumlich getrennte zu empfinden.

414. Die Feinheit des Unterscheidungsvermögens ist bei einem und demselben Menschen nicht zu allen Zeiten dieselbe. Zu verschiedenen Zeiten ist eine ungleiche Entfernung der Spitzen erforderlich, um an derselben Stelle eine Doppelempfindung zu erzeugen. Aufmerksamkeit, Uebung und andere Umstände haben darauf Einfluss. Eine Veränderung im Zustande der Haut führt auch eine Veränderung des Unterscheidungsvermögens mit sich, und zwar wird es geringer, wenn die Haut eine Dehnung erleidet. Je mehr die Haut gedehnt ist, desto weiter müssen die Spitzen an derselben Stelle, wenn sie eine Doppelempfindung erregen sollen, von einander entfernt sein. Schon hieraus lässt sich entnehmen, dass auch anderweitige Veränderungen der Haut das Unterscheidungsvermögen in bestimmter Weise modicifiren müssen. A. W. Volkmann hatte, um die Sensibilität seiner Fingerspitze zu erhöhen, die obersten Schichten der Epidermis mit einem Rasirmesser weggenommen und 24 Stunden lang einen Handschuhfinger aus Kautschuk getragen. Hierdurch war die Haut viel weicher und zarter geworden, und es fand sich, dass die Schärfe des Getastes eine sehr bemerkbare Steigerung erfahren hatte. Bedenkt man, sagt Volkmann, wie verschieden die Oberhaut an verschiedenen Stellen des Körpers entwickelt ist, so muss man fraglich finden, in wie weit die Werthe der kleinsten erkennbaren Distanzen, welche an verschiedenen Hautstellen so ungleich ausfallen,

---

*) Sitzungsberichte der kais. Akad. in Wien, Bd. XV. S. 425 und Bd. XVII. S. 580.

von Unterschieden in der Anordnung der Nerven oder von solchen in der Beschaffenheit der Oberhaut abhängen.

Ueber den Einfluss der Uebung auf das Erkennen räumlicher Distanzen stellte Volkmann*), zum Theil in Gemeinschaft mit Fechner, eine Reihe von Versuchen an, welche zu nachstehenden Folgerungen Anlass gaben: 1) die Feinheit des Raumsinnes lässt sich durch Uebung schnell vervollkommnen; 2) Das Hautorgan erweist sich für den Einfluss der Uebung empfänglicher als das Auge, welches viel schneller ermüdet. 3) Verschiedene Theile des Hautorgans sind für den Einfluss der Uebung in verschiedenem Masse empfänglich. 4) Der Einfluss der Uebung auf die Ausbildung des Raumsinnes unterliegt grossen individuellen Verschiedenheiten. 5) Die Vortheile der Uebung des Raumsinnes sind mehr oder weniger vergänglich. Das Tastorgan verliert die gewonnene Uebung sehr schnell. Schon ein Zeitraum von 24 Stunden war ausreichend, um die durch eine lange Versuchsreihe geschärfte Empfindung merklich abzustumpfen, und nach Verlauf einiger Monate war die Leistungsfähigkeit des Getastes wieder die ursprüngliche. 6) Auch bei gleichmässig fortschreitender Uebung des Raumsinnes kann die Schärfe desselben in sehr ungleichmässiger Progression zunehmen, bald schneller, bald langsamer. 7) Die Werthe der kleinsten erkennbaren Distanzen sind mit Genauigkeit nicht anzugeben, und schwanken den Beobachtungen zufolge innerhalb sehr breiter Grenzen.

Als ein bemerkenswerthes Resultat aus den bezeichneten Versuchen hebt Volkmann**) noch dies hervor: „Während sich die Schärfe des Empfindens auf der linken Körperhälfte durch Anwendung lokaler Uebungen verdoppelt, erfährt die Schärfe des Empfindens auf der rechten Seite an den entsprechenden, symmetrisch gelegenen Hautpunkten, ohne irgend welche lokale Einwirkung, eine gleichzeitige Verdoppelung."

415. In Rücksicht der räumlichen Auffassung durch den Tastsinn geht E. H. Weber***) von der Annahme aus, dass, wenn zwei sonst gleiche Eindrücke gleichzeitig denselben elementaren

---

*) Berichte der Sächs. Ges. der Wissensch. in Leipzig, 1858. S. 38.

**) a. a. O. S. 62 f.; — s. auch Fechner ebenda S. 70.

***) Art. Tastsinn in Wagner's Handb. der Physiol. Bd. III. Abth. 2. S. 526; — Berichte der Sächs. Ges. d. Wiss. in Leipzig, 1852. S. 101 ff.

Nervenfaden an verschiedenen Orten treffen, nicht zwei Empfindungen entstehen, sondern nur eine. Nun verleiht jede Nervenfaser durch eine Biegung und Theilung ihres Endes einem Hautstückchen von bestimmter Grösse Empfindlichkeit, so dass in diesem Stückchen die Berührung eines jedes Punktes zwar empfunden, aber nicht von den Berührungen anderer Punkte desselben Stückchens unterschieden werden kann. So ist die Haut in kleine Empfindungskreise getheilt, d. h. in kleine Abtheilungen, von denen jede ihre Empfindlichkeit einem elementaren Nervenfaden verdankt. Diese Empfindungskreise der Haut sind in den mit einem feineren Tastsinn versehenen Theilen kleiner, in den mit einem unvollkommneren Tastsinn begabten Theilen dagegen grösser. Damit aber zwei gleichzeitig auf die Haut gemachte Eindrücke örtlich als zwei in einem gewissen Abstande liegende Eindrücke unterschieden werden können, scheint erforderlich zu sein, dass die Eindrücke nicht nur auf zwei verschiedene Empfindungskreise gemacht werden, sondern auch, dass zwischen diesen noch ein Empfindungskreis oder mehrere Empfindungskreise liegen, auf welche kein Eindruck gemacht wird.

Was die Gestalt der Empfindungskreise betrifft, so wird von E. H. Weber mit grosser Wahrscheinlichkeit vermuthet, dass dieselben an den Armen und Beinen eine längliche Gestalt haben und so liegen, dass der Längendurchmesser nach der Längenrichtung dieser Glieder .liegt, weil man nämlich in dieser Richtung den Zirkel viel weiter öffnen muss, um die Berührungen seiner Schenkel als zwei zu empfinden, als in der Richtung, die auf der Längsaxe der Glieder senkrecht steht. An vielen anderen Theilen des Leibes zeigt sich kein solcher Unterschied, woraus gefolgert wird, dass daselbst die Empfindungskreise eine der regelmässig runden Form sich annähernde Gestalt besitzen. Je kleiner nun die Empfindungskreise sind, desto mehr derselben können auf dem Raume eines Quadratzolls der Haut Platz haben. Je mehr aber dergleichen Empfindungskreise nebeneinander auf einem gleich grossen Hautstücke liegen, desto mehr Punkte des zu empfindenden Körpers können auf der Haut unterscheidbare Eindrücke hervorbringen, und desto mehr ins Feine und Einzelne geht die Empfindung der räumlichen Verhältnisse des zu empfindenden Körpers und seiner Theile. Wenn die Empfindungskreise länglich sind und den grösseren Durchmesser stets nach derselben Richtung kehren, so wird

die Haut in dieser Richtung einen stumpferen Raumsinn besitzen als in der Richtung, nach welcher die kleineren Durchmesser der Empfindungskreise gerichtet sind*).

416. Sollen nun die Tastempfindungen, welche durch gleiche und gleichzeitige Reizung verschiedener Hautstellen erregt werden, nicht zu einer einzigen intensiven Empfindung in der Seele verschmelzen, so ist nach unseren Principien erforderlich, dass jede dieser Empfindungen mit einer eigenthümlichen qualitativen Nebenbestimmung verknüpft ist, die eben ihre völlige Verschmelzung mit den andern verhindert. Lotze**) führt als Umstände, die zur Entstehung solcher qualitativen Nebenbestimmungen (Localzeichen) Anlass geben können, unter anderem Nachstehendes an. Erstlich kommt in Betracht, dass kein noch so leiser Druck auf eine umschriebene Hautstelle ausgeübt werden kann, ohne eine geringe Fortpflanzung des Zuges oder der Dehnung auf die nächste Umgebung zu verursachen. Hiernach wird sich für jede gereizte Stelle, je nach der verschiedenen Unterstützung, dem Spannungsgrade, der Dicke und dem Nervenreichthum dieser Umgebung, die Summe der erregten Nebenempfindungen als eine eigenthümliche ergeben. Klopft man mit dem Finger auf Hautstellen, die unmittelbar über Knochen gespannt sind, so erhält man Berührungsgefühle, die untereinander sehr ähnlich, dagegen charakteristisch sehr verschieden von denen solcher Hautstellen sind, unter welchen Sehnen oder grössere Muskelmassen verlaufen. Führt man also den klopfenden Finger von Hauttheilen, die durch feste Unterlagen gestützt sind, auf andere über, die über weichen Organen eine beträchtliche Verschiebung gestatten, so werden diesen Umständen entsprechend die qualitativen Eigenthümlichkeiten der Empfindungen wechseln. Neben dieser Irradiation der physischen Erschütterungen kann auch die Anzahl der einzelnen Tastorgane, die eine Hautstelle besitzt, nicht gleichgiltig sein. Es muss einen Unterschied machen, ob die Reize, die auf gewisse Punkte einer Hautstrecke ausgeübt werden, unmittelbar zu den Tastwärzchen gelangen können, oder nur durch die Erschütterungen, welche sie durch das nichtnervöse Gewebe zu ihnen hinsenden. Findet jeder Reiz unmittelbar Zugang zu einem Tastorgan, so bewirkt er hier eine

*) s. E. H. Weber in d. Ber. d. Sächs. Ges. d. Wiss., 1852. S. 103 f.
**) Medic. Psychologie. S. 406 f.

kraftvolle Erregung, neben der sich „alle irradiirten Empfindungen nur als begleitende Elemente“ geltend machen. Auf die Ausdehnung dieser Nebenerregungen muss aber der Nervenreichthum der Umgebung einen entschiedenen Einfluss üben. Auch vermuthet Lotze, dass die Tastkörperchen der Haut weder überall so auf gleiche Weise in das Gewebe derselben eingebettet, noch überall so gleich organisirt seien, dass sie denselben Reiz an allen Stellen in gleicher Art und Grösse aufzunehmen vermöchten. Eine ansehnliche Verschiedenheit in der Anordnung dieser kleinen Sinneswerkzeuge lasse sich aber aus der von E. H. Weber festgestellten Thatsache entnehmen, nämlich daraus, dass die Reizbarkeit gegen Wärme und Druck und die Empfindlichkeit gegen Berührung überhaupt nicht in den Theilen stets am grössten ist, die sich durch den feinsten Ortsinn auszeichnen. Vielleicht gibt es verschiedene Gattungen dieser Organe, von denen die einen den Wärmeempfindungen, die andern den Druckempfindungen bestimmt sind. Wenn nun die Tastkörperchen, wie Lotze bemerkt, hier grösser, dort kleiner, hier dichter gedrängt, dort zerstreuter, hier den äusseren Reizen zugänglicher, dort durch dickere Bedeckungen gegen sie geschützter liegen, und überdies auch an verschiedenen Hautstellen in mannigfach wechselnden Verhältnissen sich gemischt finden, so fehlt es wohl nicht an Hilfsmitteln, vermöge deren die Empfindung für jeden gereizten Hautpunkt eine charakteristische Nebenbestimmung empfangen kann.

Sehr wohl vereinbar hiermit ist, wie mir scheint, die von Weber aufgestellte Lehre von den Empfindungskreisen der Haut, wenn man annimmt, dass jeder elementare Nervenfaden, auf die bezeichnete Weise, der Seele einen Eindruck von eigenthümlicher Qualität zuführt.

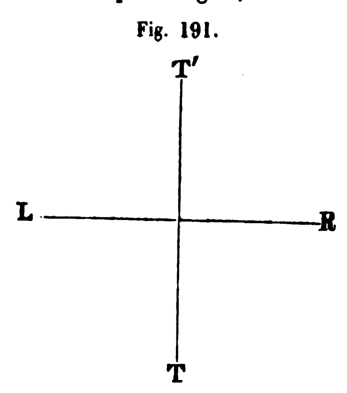
417. Es lässt sich nun erwarten, dass eine Mehrheit von Tastempfindungen, wie sie entsteht, wenn das tastende Organ, etwa ein Finger, auf der Oberfläche eines Körpers ruht, von der Seele in der Form des räumlichen Nebeneinander, d. h. flächenhaft, vorgestellt werden muss. Die Bedingung hierzu wird gegeben sein, wenn die einzelnen Empfindungen, welche hier durch die Reizung einer grösseren Anzahl benachbarter Hautstellen zugleich entstehen, nicht zu einem intensiven Eins in der Seele verschmelzen können. Allein die weitere Ausbildung und Vollendung der räumlichen Auffassungen durch den Tastsinn kann wohl erst durch die Bewegung

des Organs geschehen. Wenn der tastende Finger sich auf einer überall gleichmässig glatten und harten Fläche fortbewegt, entsteht derselbe Complex von Tastempfindungen immer von Neuem, und die nacheinander erzeugten Complexe nehmen die Form einer Reihe an, indem zugleich mit den verschiedenen Stellungen des Tastgliedes eine Reihe fein abgestufter Muskelempfindungen entsteht. Es zeigt sich aber schon hier ein bemerkenswerther Unterschied zwischen den Auffassungen des Gesichtes und Getastes. Während nämlich der Finger längs einer Fläche fortgleitet, sind die früheren Glieder der gebildeten Reihe nicht mehr so, wie die vorhergehenden Glieder einer durch die Bewegung des Auges erzeugten Reihe von Farbenempfindungen in der Seele sinnlich gegenwärtig, sondern darin nur noch in der Erinnerung vorhanden. Indem jeder vorhergehende Complex von Tastempfindungen sich mit den nachfolgenden bis zu einem gewissen Grade verbindet und noch eine Zeitlang im Bewusstsein festgehalten wird, können zwar auch, wenn das tastende Glied in der nämlichen Richtung zurückkehrt und die begleitenden Muskelempfindungen in umgekehrter Folge von Neuem erzeugt, die vorausgegangenen Glieder bis zu einem gewissen Masse simultan reproducirt werden; allein jene von allen Gliedern ausgehenden und widereinander laufenden Reproductionen (S. 565 f., 568 ff.), durch welche die sämmtlichen Glieder einer Reihe, wenigstens innerhalb gewisser Grenzen, simultan zum klaren Vorstellen gebracht werden, finden hier, beim Tastsinn, nicht in der Art wie bei den Auffassungen des Gesichtssinnes statt, weil eben die früheren Glieder nicht mehr sinnlich gegeben sind, wenn die nachfolgenden in die Seele eintreten oder die Auffassung zu dem Anfangsgliede zurückkehrt. Mehr schon, wie es scheint, nähern sich in dieser Beziehung die Auffassungen des Getastes denen des Gesichtssinnes, wenn statt eines Fingers sämmtliche Fingerspitzen zugleich auf einer Fläche in Bewegung gesetzt werden.

418. Die Reihen der Muskelempfindungen, welche sich beim Hin- und Hergleiten der Fingerspitzen auf einer Fläche erzeugen, führen in das Tastbild der letzteren die Hauptrichtungen ein, die sich innerhalb dieser Fläche unterscheiden lassen. Wird mit dem Finger zugleich der ganze Arm bewegt, so macht es einen Unterschied, ob die Bewegung der Finger eine gewisse einmal angenommene Stellung des Armes und seiner Theile unverändert lässt oder nicht. Gleiten z. B. die Finger von der Linken gegen die

Rechte oder in umgekehrter Richtung hin und her, so werden die Muskelempfindungen, die hierbei entstehen, verschieden seiu von jenen, die bei dem Hin- und Herfahren der Finger längs der Richtung TT' in der Art erzeugt werden, dass dieselben sich abwechselnd dem eignen Leibe nähern und von ihm entfernen. Derselbe Unterschied macht sich geltend, wenn man nur die Fingerhand bewegt, entweder indem man den Daumen aufstemmt und die vier übrigen Finger nach verschiedenen Richtungen hin und her gleiten lässt, oder so, dass man umgekehrt die vier Finger ruhen lässt und den Daumen hin und her bewegt.

Fig. 191.



Geht aber die Hand nach dem Betasten der horizontalen Fläche eines Körpers zu einer dazu senkrecht stehenden, also vertikalen Fläche über, so wird theils die Stellung der Hand und ihrer Glieder eine von der früheren abweichende, theils auch die Bewegungsrichtung beim Betasten der neuen Fläche eine andere. Und die Folge von diesem Allen ist, dass sich die Reihen der Muskelempfindungen beim Durchtasten der vertikalen Fläche auf eine bestimmte Weise von jenen unterscheiden werden, welche durch die Bewegung desselben Organs auf einer horizontalen Fläche entstehen. Aehnliche Veränderungen finden auch statt, wenn ein einzelnes Glied, z. B. der Daumen, abwechselnd eine horizontale und vertikale Fläche betastet, während die übrigen Finger auf der horizontalen Ebene eine feste Lage behalten. Wird der Uebergang von der einen Fläche zur andern durch eine scharfe Kante vermittelt, so scheidet diese die neue Stellung des Gliedes von der früheren, wozu noch kommt, dass das Hin- und Herfahren des Fingers auf der Kante eine mehr lineare Reihe von Tastempfindungen gewährt, während der Uebergang des Fingers in die eine oder andere Fläche sofort, wegen der gleichzeitigen Affection einer grösseren Anzahl von Hautstellen, zu einem grösseren flächenartigen Tastbilde führt. Die grösste Mannigfaltigkeit bietet dem Tastgliede die scharfe Ecke eines Körpers, in welcher drei Kanten zusammenstossen. Die Verfolgung einer jeden von ihnen bietet etwas Eigenthümliches, insofern sie, durch eine eigenthümliche Reihe von Muskelempfindungen,

charakterisirt ist. Auch kann das Tastglied von einer solchen Ecke aus zu drei verschiedenen Flächen, und zwar zu jeder auf eine eigenthümliche Weise übergehen*).

Es kann nun nicht ausbleiben, dass die durch wiederholte successive Wahrnehmung aufgefassten Flächen eines Körpers sich zu einem Gesammtbilde desselben vereinigen, das auch sofort wieder erweckt wird, wenn beim abermaligen Erfassen des Körpers ein gewisses Muskelgefühl wiederkehrt, das einer bestimmten Beugung und gegenseitigen Stellung der Finger entspricht, wie sie zum Auffassen der verschiedenen Theile des Körpers wohl am günstigsten war. Nachdem die Kenntniss der verschiedenen Theile einer Körpergestalt durch successive Wahrnehmung gewonnen ist, wird sich schliesslich immer eine bestimmte gegenseitige Stellung und Beugung der Fingerglieder herausstellen, durch welche jene Theile gewissermassen in einem Zuge oder mit einem Griffe zusammengefasst werden können. Nimmt man nun von Neuem denselben oder auch irgend einen ähnlichen Körper zwischen die Finger, so wird jene bestimmte Stellung der Glieder die Gestalt des Körpers im Bewusstsein reproduciren, oder es wird mit der bestimmten Gliederstellung die Erwartung einer bestimmten Körpergestalt ins Bewusstsein treten, und wenige Tastversuche genügen, diese Erwartung zu bestätigen.

419. Auch der Abstand zweier Finger kann durch das Muskelgefühl erkannt werden, welches einer bestimmten Stellung und Entfernung derselben entspricht. Liegen die Finger z. B. auf einer horizontalen Platte und berührt zunächst der Zeigefinger den Daumen, so entsteht bei der allmäligen Entfernung des ersteren vom letzteren eine Reihe bestimmter Muskelempfindungen, die im Falle, wo der Zeigefinger auf der Platte fortgleitet, mit den gleichzeitigen Tastempfindungen sich associiren. Kehrt der Zeigefinger in umgekehrter Richtung zum Daumen zurück, so wird dieselbe Reihe von Muskel- und Tastempfindungen in umgekehrter Folge wieder erzeugt. Nun kann anfänglich sowohl die Reihe der Tast- als auch die der Muskelempfindungen zum Masse des Abstandes dienen, wenn sich nämlich der Zeigefinger vom Daumen entfernt oder ab-

*) Vgl. Th. Waitz, Lehrbuch d. Psychologie S. 258 ff., u. W. F. Volkmann, Grundriss der Psychologie, S. 194 ff.

wechselnd sich von ihm entfernt und bis zur Berührung ihm nähert. Da aber bei jeder Entfernung des Zeigefingers vom Daumen mit der entsprechenden Stellung beider Glieder ein eigenthümliches Muskelgefühl verbunden ist, das sich auch ohne begleitende Tastempfindungen geltend macht, so wird dasselbe bei seinem erneuerten Eintritt auf die Entfernung beider Finger hindeuten. So können wir auch, und zwar ohne Hilfe des Gesichtssinnes, erfahren, ob der Daumen und der Zeigefinger oder überhaupt zwei Finger sich gegenseitig nähern oder voneinander entfernen. Diese Kenntniss gewinnt dadurch Eingang in unser Bewusstsein, dass sich an die Tastempfindung, welche bei der Berührung beider Finger entsteht, eine Reihe eigenthümlicher Muskelempfindungen anschliesst, wenn beide Finger voneinander entfernt werden, während im andern Falle, nämlich bei der Annäherung beider Finger bis zur Berührung, umgekehrt eine Reihe eigenthümlicher Muskelempfindungen mit einer Tastempfindung abschliesst. Die Eigenthümlichkeit im Verlaufe der in beiden Fällen auftretenden Muskelempfindungen deutet dann nachmals überhaupt auf eine Annäherung oder Entfernung der Finger hin. Und in derselben Weise lernen wir auch die gegenseitige Annäherung oder Entfernung beider Hände kennen.

Sodann lässt sich aus der Art und Grösse des Muskelgefühls auch die Dicke eines Körpers bestimmen, wenn man diesen zwischen die Finger nimmt oder mit der ganzen Hand umspannt, oder endlich bei grösserer Ausdehnung mit beiden Händen umfasst.

420. Die Länge und Breite einer Fläche ergibt sich aus der Reihe der Tast- und Muskelempfindungen, welche sich beim Fortgleiten der Finger nach diesen Dimensionen erzeugen. Ist aber die Hand einmal als ein räumlich ausgebreitetes (flächenhaftes) Organ erkannt, so dient sie selbst zum Flächenmessen, indem sie ihrer ganzen Ausdehnung nach auf der Fläche fortgeführt und so als Massstab benutzt wird.

Jedenfalls wird uns eine Fläche um so grösser erscheinen müssen, je grösser die Anzahl der gesonderten Empfindungen ist, die wir durch das Organ von derselben empfangen. Hiernach kann denn auch ein und dasselbe Flächenstück, z. B. ein Quadratzoll, wenn es nacheinander mit verschiedenen Theilen unseres Tastorgans, etwa mit der Zungenspitze und dem Finger, untersucht wird, von verschiedener Grösse erscheinen, wenn in beiden Fällen die

Anzahl der unterscheidbaren Tastempfindungen eine ungleiche ist. Können wir mittelst der Zungenspitze auf einer Quadratlinie mehr unterscheidbare Theile wahrnehmen als durch den Finger, so muss für den letzteren die betastete Fläche wohl kleiner als für die Zunge erscheinen. Nun hat E. H. Weber*) darauf hingewiesen, dass die Fähigkeit auf einer Quadratlinie viele Theile unterscheiden zu können, von der Zahl der elementaren Nervenfäden abhängt, die sich auf einer Quadratlinie unserer Haut endigen; da aber auf dem mittelsten Theil der Nervenhaut unseres Auges die Enden der Elementarnerven viel dichter vorkommen als in der Haut, und wir also mittelst des Auges auf einer Quadratlinie viel mehr unterscheidbare Theile wahrnehmen können, als mittelst der Haut, so benutzen wir vorzugsweise den Massstab, der uns im Auge gegeben ist, und suchen auch das, was wir mittelst des Tastsinnes wahrnehmen, auf jenen Massstab zu reduciren. Daher muss dem Blindgebornen, der nur auf den Tastsinn angewiesen ist, der Raum eines Zolles mit einer viel geringeren Zahl unterscheidbarer Theile ausgefüllt und also kleiner zu sein scheinen, als einem Sehenden. In Uebereinstimmung hiermit steht die Erfahrung, dass glücklich geheilte Blindgeborne die gesehenen Objecte grösser fanden, als sie ihnen früher bei dem Betasten erschienen waren, wobei jedoch noch der Umstand in Betracht kommt, den wir im §. 400 hervorgehoben haben.

421. Drückt man das Ende, nämlich den Querschnitt einer cylindrischen oder prismatischen Blechröhre an unsere Haut an, ohne dass man es sehen kann, so entsteht auf der letzteren ein Druckbild, und wir nehmen bei hinreichender Grösse des Durchmessers die Gestalt jenes Querschnitts wahr. Bei Anwendung cylindrischer Röhren von verschiedenem Durchmesser findet sich, dass das Ende der Röhre als ein solider Körper von unbestimmter Gestalt wahrgenommen wird, wenn dieselbe nicht einen Durchmesser hat, der etwas grösser ist als der Abstand der Zirkelspitzen, für welchen an dem betreffenden Körpertheile zwei Empfindungen unterschieden werden. Die Figur eines Kreises und eines davon eingeschlossenen Raumes empfand E. H. Weber**), wenn die Röhre

*) Art. Tastsinn im Handw. d. Physiol. von Wagner, Bd. III. Abth. 2. S. 528 f.

**) Art. Tastsinn, S. 540 f.

$1\frac{1}{2}$ P. Linie im Durchmesser hatte, nur mit der Zungenspitze, nicht mit der Lippe und Fingerspitze, bei 2 Linien Durchmesser nur mit dem mittleren Theile der Oberlippe und dunkler mit den Fingerspitzen, aber nicht an dem Gelenktheile des letzten Gliedes oder am zweiten Gliede. Hier war, um die Figur wahrzunehmen, ein Durchmesser von 4 Linien erforderlich, und auf dem ersten Gliede ein solcher von 5 Linien. Wir können also unter diesen Umständen die Figur eines uns berührenden Kreises auch ohne Bewegung der Tastorgane wahrnehmen; allein man hat anerkannt, dass diese Wahrnehmung schon eine Kenntniss von der Lage der berührten Hauttheile voraussetzt. Und auch diese Kenntniss ist keine ursprüngliche, sondern eine erfahrungsmässig gewonnene. Doch möchten Manche vielleicht es für wahrscheinlich halten, dass eine Fläche, die man an die Haut andrückt, ohne Weiteres in ihrer bestimmten Gestalt erkannt werde, insofern der ganze Complex von Tastempfindungen, welchen die Fläche erregt, die Seele sofort zur Vorstellung der bestimmten Form veranlasse. Mag die Seele sich immerhin die gleichzeitig gegebenen Tastempfindungen in der Form eines continuirlichen Nebeneinander, d. h. flächenhaft, vorstellen; das Bild einer bestimmten Gestalt wird hiermit nicht nothwendig verknüpft sein, also nicht die Gestalt eines Drei- oder Vierecks, falls etwa die an die Haut gedrückte Fläche diese Gestalt hat. Eher könnte man vermuthen, dass der ganze Complex von Empfindungen, von welcher Gestalt er auch herrühren mag, als eine kreisförmige Fläche vorgestellt werde; denn die Ecken, welche die wirkliche Fläche besitzt, können von der Seele nicht percipirt werden. Diese setzt die Erregungszustände der gereizten Nervenfasern in Empfindungen um, die nun im Falle ihres Nichtverschmelzens zu Einer Empfindung zwar in räumlicher Ausbreitung, aber ohne festen der Wirklichkeit entsprechenden Umriss, erscheinen werden. Dagegen hat man wohl, auf Grund unserer früheren Betrachtungen, eingesehen, dass die Reihen der Muskelempfindungen, welche während der Umschreibung einer körperlichen Gestalt mit dem Finger entstehen, in den Complex der gegebenen Tastempfindungen neue Beziehungen, d. h. Richtungen einführen können, durch welche sich auch ein Bild von den Umrissen der gegebenen Gestalt gewinnen lässt.

422. Nicht unmittelbar gelangen wir zur Kenntniss des Abstandes zweier Körpertheile, etwa zweier Zirkelspitzen, die

gleichzeitig in einer gewissen Entfernung die Haut berühren. Zunächst haben wir von beiden Berührungen nur zwei besondere Empfindungen, die wegen einer gewissen Verschiedenheit ihres qualitativen Inhaltes nicht zu Einer Empfindung in der Seele verschmelzen können; aber keine dieser Empfindungen deutet an sich auf ihre Ursprungsstelle und noch weniger auf die gegenseitige räumliche Lage der gereizten Hautpunkte hin. Zur Wahrnehmung des Abstandes zweier gleichzeitig gereizten Hautpunkte ist erforderlich, dass wir auch von der dazwischen liegenden Strecke schon irgend eine Vorstellung gewonnen haben, so dass diese durch die Empfindungen, welche von der Reizung jener beiden Punkte herrühren, reproducirt werden kann. Nun erhalten wir wie von irgend einem Körper, so auch von unserem eignen Leibe eine Vorstellung seiner Oberfläche, indem der bewegliche Theil unseres Tastorgans, vornehmlich also die Hand, über die sensible Oberfläche des Leibes in mannigfachen Richtungen hingleitet und geordnete Reihen von Tastempfindungen erzeugt, die mit den gleichzeitig auftretenden Muskelempfindungen sich associiren. Doch kommt hier, bei der Betastung des eignen Leibes, noch in Betracht, dass wir jeden der einander berührenden Theile mittelst des andern empfinden. Während der Finger auf der Oberfläche des Leibes hinfährt, erhalten wir eine Reihe von Tastempfindungen von Seiten der durch den Finger gereizten Hautstellen, wozu sich noch die eigenthümlichen vom Finger herrührenden Tastempfindungen und zugleich die Muskelgefühle während der Bewegung des Fingers gesellen. Geht nun aber die Hand über ein nervenreicheres Hautstück, so wird sie, unter sonst gleichen Umständen, zu einer grösseren Anzahl von unterscheidbaren Tastempfindungen führen, als wenn sie sich über Hautstücke bewegt, in welchen weniger elementare Nervenfasern endigen. Hat man nun bereits durch das Betasten des Leibes eine ziemlich distincte Vorstellung von der Oberfläche seiner verschiedenen Theile gewonnen, so muss der so eben bemerkte Umstand sich in bestimmter Weise geltend machen. Die Folge davon wird die sein, dass eine und dieselbe wirkliche Entfernung zweier berührenden Punkte an verschiedenen Orten des Leibes von ungleicher Grösse erscheint. Die beiden durch die Berührung sinnlich gegebenen Empfindungen werden an Orten, denen ein feineres Unterscheidungsvermögen zukommt, und die also auch früher beim Betasten eine grössere Anzahl von un-

terscheidbaren Empfindungen auf den Raum einer Linie oder eines Zolls lieferten, nun auf Grund der bereits gewonnenen Erfahrungen die Vorstellung eines grösseren Zwischenraumes reproduciren. So scheinen sich zwei Zirkelspitzen, deren Oeffnung unverändert bleibt, bald einander zu nähern, bald voneinander zu entfernen, wenn man sie über grössere Hautpartien in einem Zuge fortführt. Man öffne einen Zirkel, nach Versuchen von E. H. Weber*), etwa 4 oder 6 Par. Linien weit, berühre mit den in querer Richtung gehaltenen Enden die Mitte des Unterarms und führe ihn dann in steter und gleichmässiger Berührung mit der Haut nach der Hohlhand und nach der Spitze des Zeigefingers hin. Dann erscheint der Zirkel anfangs nur Eine Linie zu beschreiben, die sich aber auf der Hand in zwei Linien theilt; und je mehr man sich nun der Spitze des Zeigefingers nähert, desto mehr scheint sich der Zirkel aufzuthun, und um so mehr scheinen auch die Linien, die er beschreibt, sich voneinander zu entfernen. Dasselbe erfährt man an der Zunge, wenn man den Zirkel zwei Linien weit geöffnet in querer Stellung auf die Mitte des Zungenrückens setzt und ihn dann in steter Berührung mit der Zunge zur Spitze der letzteren führt.

423. Nun scheint es mir allerdings, damit überhaupt die Vorstellung eines Abstandes zwischen zwei gereizten Hautpunkten bewirkt werde, erforderlich zu sein, dass zwischen den letzteren noch eine gewisse Anzahl von Punkten liegt, deren Berührung zu unterscheidbaren Empfindungen führen kann; oder es müssen, im Hinblick auf die von E. H. Weber hervorgehobenen Empfindungskreise, zwischen den beiden berührten Kreisen noch mehrere nicht afficirte liegen. Es ist möglich, dass schon die gleichzeitige Berührung zweier nächstbenachbarter Kreise zwei Empfindungen gibt, die wegen gewisser qualitativer Nebenbestimmungen nicht ganz zu einem intensiven Eins verschmelzen können. Aber es ist auch möglich, dass erst zwei Kreise, die wenigstens durch e i n e n anderen Empfindungskreis getrennt sind, bei gleichzeitiger Berührung zu zwei unterscheidbaren Empfindungen führen, jedoch ohne die Vorstellung einer zwischen ihnen befindlichen Distanz. In diesem Falle würde doch der ganze Complex von Tastempfindungen, welcher entsteht, wenn man die Fläche eines Körpers an die Haut drückt, in der Form eines continuirlichen Nebeneinander von der

*) a. a. O. S. 526.

Seele vorgestellt werden; und es müssten dann zwei gereizte Hautpunkte oder vielmehr die Empfindungskreise, welchen sie angehören, mindestens durch zwei andere Empfindungskreise getrennt sein, wenn ihre Berührungen die Vorstellung eines Zwischenraumes gewähren sollen. Wahrscheinlich ist es jedoch, dass in Wirklichkeit die distincte Vorstellung des Abstandes zweier gereizten Hautpunkte mehr als zwei zwischen ihnen gelegene Empfindungskreise erfordert. Je grösser aber die Anzahl der letzteren, innerhalb gewisser Grenzen, ist, desto bestimmter werden die durch die gleichzeitige Berührung zweier Hautpunkte veranlassten Empfindungen als zwei unterschieden werden, und um so bestimmter wird auch die Vorstellung zweier örtlich in einem gewissen Abstande voneinanderliegenden Eindrücke hervortreten. In Bezug auf die kleinsten wahrnehmbaren Distanzen bietet sich nun hier ein gewisser Spielraum dar. Man erkennt nämlich, dass die qualitativen Nebenbestimmungen zweier Tastempfindungen, welche aus der gleichzeitigen Berührung zweier unmittelbar aneinander grenzenden oder auch zweier durch mehrere andere getrennten Empfindungskreise resultiren, so wenig verschieden sein können, dass sie sich unter gewöhnlichen Umständen nicht hinreichend genug in der Seele geltend machen können, um die beiden Tastempfindungen im Bewusstsein mit einiger Schärfe auseinander zu halten, während ihnen dies durch den Einfluss gesteigerter Aufmerksamkeit und fortgesetzter Uebung wohl gelingen mag. Daher es sehr natürlich erscheint, dass durch den Einfluss der Uebung das Erkennen kleiner räumlicher Distanzen auf der Haut allmälig nicht unbeträchtlich gesteigert werden kann (S. 597), und dass für Blinde, nach Czermak's Beobachtungen, zur Erzeugung einer deutlichen Doppelempfindung eine viel geringere Distanz der auf die Haut gesetzten Zirkelspitzen nöthig ist als für Sehende, was wohl grösstentheils daher kommen mag, dass Blinde schon anfänglich und auch fortdauernd eben viel mehr als Sehende den Auffassungen des Tastsinnes die Aufmerksamkeit zuwenden.

Reflectiren wir hier, im Rückblick auf das Vorstehende, gelegentlich auf die Nervenhaut des Auges, so müssen wir sagen, dass zwischen zwei gereizten Empfindungskreisen mindestens ein anderer Empfindungskreis liegen muss, wenn es überhaupt zur Vorstellung eines Abstandes zweier Punkte im Sehfelde kommen soll; d. h. es muss zu diesem Behufe, in Bezug auf den gelben

Fleck, zwischen zwei gereizten Zapfen wenigstens noch ein anderer liegen. Die Erregungszustände zweier unmittelbar aneinander grenzender Zäpfchen können wohl schon zu zwei unterscheidbaren Empfindungen führen, aber die Seele wird sie nur in der Form des continuirlichen Nebeneinander, also ohne Distanz vorstellen können.

424. Wir fanden zwischen den räumlichen Wahrnehmungen des Gesichts- und Tastsinnes mancherlei Analogien, aber auch einen erheblichen Unterschied schon in Rücksicht der ersten Auffassungen beider Sinne. Bei grösseren Objecten ist der Tastsinn an eine Reihe successiver Auffassungen gebunden, deren frühere Glieder noch als Gedächtnissbilder vorhanden sind, wenn die späteren sinnlich gegeben werden; was eben so der Fall ist, wenn der Blinde von einem Object zum andern übergeht und sich rücksichtlich der räumlichen Verhältnisse seiner Umgebung zu orientiren sucht. Geht der Blinde zwischen denselben Objecten öfter hin und her, sei es nun mit der Hand oder mit dem ganzen Körper, so kann es wohl nicht ausbleiben, dass er sich diese Objecte in räumlicher Weise, in einem bestimmten Neben- und Hintereinander, vorstellt. Denn eben die Umkehr in der Auffassung dieser Dinge, indem er sich zwischen denselben, bald in der einen, bald in der entgegengesetzten Richtung, bewegt, wird es verhüten, dass die Vorstellungsreihe derselben in einer einseitigen Richtung abläuft. Wie in der Wirklichkeit, so wird er auch in Gedanken, d. h. in seinem Vorstellen, zwischen den in zeitlicher Wahrnehmung wiederholt aufgefassten Objecten hin und her wandern, und dadurch das successiv Aufgefasste in dem Gesammtbilde seiner gewohnten Umgebung als ein auf bestimmte Weise Nebeneinanderstehendes denken. Allerdings wird das räumliche Vorstellen des Blinden, im Vergleich zu dem des Sehenden, auf einen verhältnissmässig sehr kleinen Raum beschränkt bleiben und auch sonst nicht einen so hohen Grad der Ausbildung erreichen können; allein man kann wohl nicht in aller Strenge behaupten, dass die Raumvorstellungen des Blinden nur ein verwickeltes System von Zeitvorstellungen seien*), obschon nicht zu leugnen ist, dass in dem räumlichen Vorstellen des Blinden statt der simultanen An-

*) s. Hagen im Handw. der Physiol. von Wagner, Bd. II. S. 718.

schauung, die sich beim Sehenden sehr bald herausstellt, die Succession vorherrschen muss.

Es ist ein Vorzug des Gesichtssinnes, dass auf der Retina des Auges selbst von einem verhältnissmässig grossen Object, dessen Auffassung dem Blinden geradezu unmöglich ist, ein scharf begrenztes Bild erzeugt werden kann. Ist das Object so gross, dass es sich in der Nähe nicht bequem überschauen lässt, so wird es in grösserer Entfernung ein zwar verhältnissmässig kleineres, aber doch immer noch hinreichend deutliches Retinabild gewähren, das nun ein bequemes Ueberschauen gestattet. Und wenn sich auch hier die Auffassung in vielen Fällen erst nach einer Menge von successiven Wahrnehmungen vollendet, indem die verschiedenen Theile des Objects in rascher Succession auf die empfindlichste Stelle der Retina gebracht werden, so stellt sich doch das Ganze in Rücksicht seiner Haupttheile sehr bald als ein Simultanes dar. Denn wir wissen, dass bei den Auffassungen durch den Gesichtssinn die früheren Glieder, wenigstens zum Theil, noch sinnlich gegenwärtig sind, wenn die späteren hinzutreten; daher sofort, nachdem die von den Grenzgliedern ausgehenden und widereinander laufenden Reproductionen der Zwischenglieder sich ins Gleichgewicht gesetzt haben, das successiv Aufgefasste in der Form eines ruhenden Nebeneinander erscheinen wird. Hierbei ist es nun auch von Bedeutung, dass die successiven Wahrnehmungen des Auges ungleich rascher als die des Tastorgans geschehen, welches letztere beim Betasten eines Objects von grösseren Dimensionen einer sehr merklichen Zeit bedarf, während das Auge dagegen in einer verhältnissmässig fast verschwindend kleinen Zeit das Bild eines solchen Objects nach allen möglichen Richtungen über die empfindlichste Stelle des Auges zu führen vermag. Nur dann, wenn ein Object eine grosse Mannigfaltigkeit von Einzelnheiten bietet, erfordert auch die Wahrnehmung vermittelst des Auges eine längere Zeit. Endlich vermögen auch viele Objecte zugleich auf der Retina des Auges sich abzubilden, die in rascher Succession deutlich angeschaut und dann auch bei ruhendem Auge in verschiedenen Graden der Deutlichkeit wahrgenommen werden können, während der Blinde nur mühevoll von einem Object zum andern forttasten kann.

425. Die äussersten Grenzen des sinnlichen Sehfeldes bietet uns die Atmosphäre unserer Erde, d. h. das sog. Himmelsgewölbe, dar. Allein das Vorstellen geht, selbst wohl im rohen Menschen,

über diese Grenzen hinaus. Die Raumvorstellungen des Kindes erfahren allmälig eine fortwährende Erweiterung schon dadurch, dass es wiederholt aus einem Zimmer und Hause in andere Zimmer und Häuser getragen wird. Daher wird ihm bald der Anblick einer verschlossenen Thür, auch wenn diese nicht zu einer schon bekannten Localität führt und die letztere reproduciren kann, die unbestimmte Erwartung eines Jenseitigen erregen, das auf Grund der bereits gewonnenen Erfahrungen nur den Charakter des Räumlichen an sich tragen kann. Und so wird sich eine solche Erwartung allmälig auch beim Anblick des Himmels herausstellen. Hat aber der Mensch sich bereits vielfach durch eigne Anstrengung umher bewegt, so erscheint ihm schliesslich die Bewegung als ein Vorgang, der unaufhörlich in derselben Weise wiederholt werden kann; und dieser Gedanke überträgt sich beim Sehenden auch auf die Bewegung eines fremden Objects, so auf den Flug der Vögel, die sich innerhalb der Atmosphäre mehr und mehr erhebend endlich dem Auge entschwinden. Hiermit ist aber ohne Zweifel eine Erweiterung der bereits gewonnenen Raumvorstellungen über jede Grenze hinaus verbunden. Man wird sich der Unendlichkeit des Raumes bewusst, was zunächst nur heisst, dass jede erreichte Grenze als eine solche erscheint, die sofort überschritten und für die weiteren Fortschreitungen als Anfangsglied betrachtet werden kann. Die Art und Weise des Fortschrittes, nach welcher Richtung hin derselbe auch geschehen mag, bleibt für das Vorstellen immer derselbe. Nicht anders verhält es sich mit der Unendlichkeit der Zeit, nur mit dem Unterschiede, dass die Zeitreihe stets nach einer Richtung abläuft, während das räumliche Vorstellen von jedem Object aus nach allen möglichen Richtungen zu andern Objecten übergehen kann. Dieser nach allen Seiten mögliche Uebergang ist im Bewusstsein gegenwärtig als der leere Umgebungsraum, welcher sich an die Vorstellung eines jeden abgeschlossenen Objects knüpft, und der sich für viele Objecte, die in der Wahrnehmung zusammengefasst werden, zu einem grösseren gemeinsamen Umgebungsraume eröffnet, und allmälig auf dieselbe Weise immer mehr an Ausdehnung gewinnt, so namentlich auch durch die theils wirklich vollbrachte, theils auch nur eingebildete Bewegung der Objecte.

426. Obwohl die Sinnesempfindungen nur intensive Zustände des Centralorgans und der Seele sind und sein können, so werden

sie doch, wie allbekannt, auf bestimmte Stellen des Leibes bezogen, d. h. localisirt und überdies auch, wie die Farben und Widerstände des Betasteten, als Eigenschaften ausser uns befindlicher Objecte aufgefasst. Wie dies geschieht, folgt nun schon aus den bereits dargelegten Erörterungen über das räumliche Vorstellen. Wir wissen, dass ganze Complexe von Tastempfindungen sowohl als von Farbenempfindungen in der Seele die Vorstellung eines räumlich Ausgebreiteten gewähren müssen; daher denn diese Complexe insofern auch sofort gewissermassen als ein Aeusseres erscheinen können, zunächst jedoch ohne bestimmten Gegensatz gegen ein Inneres. Zu einer klaren und scharfen Entgegensetzung des Innern und Aeussern kann es erst kommen, nachdem der Mensch, zuvörderst durch die Auffassung seines eigenen Leibes, zu einer Vorstellung des eigenen Selbst gekommen ist, das als der Mittelpunkt aller Ortsbestimmungen und als der Anfangspunkt aller Bewegungen erscheint, durch welche der Mensch nach aussen wirkt, und die physiologisch mit gewissen körperlichen Affectionen, durch diese aber psychologisch mit den Regungen des Begehrens zusammenhängen. Die Seele des Menschen ist zunächst durch seinen Leib nicht allein der bewegliche Mittelpunkt aller Ortsbestimmungen in der Welt, sondern auch der Anfangspunkt der Begehrungen und Handlungen, und der Endpunkt, in den sie zurücklaufen*).

Beim Beginn des Sehens breiten sich die Lichtempfindungen flächenhaft, in der Form des continuirlichen Nebeneinander, gewissermassen auf einer vertikalen Horopterebene aus, worin die gesehenen Dinge, welchen geschlossene Complexe von Empfindungen entsprechen, auch bald in bestimmten, selbst leeren, Distanzen erscheinen können, wenn der Uebergang des Blickes von einem Object zum andern durch eine Reihe von Muskelempfindungen ohne begleitende Licht- oder Farbenempfindungen vermittelt wird. Wahrscheinlich gesellen sich hierzu schon frühzeitig die Auffassungen der Dinge nach der Tiefendimension, auch ohne unsere eigene selbstthätige Bewegung im Raume, wenigstens von dem Moment an, wo das Auge sich zum Behufe der Herstellung deutlicher Netzhautbilder genügend einrichten kann und ein freieres Spiel der Sehaxenconvergenz beider Augen gewonnen ist (S. 518 ff.).

427. Nun gelangt der Mensch durch den Gesichts- und

*) s. Herbart, Psychologie als Wissenschaft etc. Thl. II. S. 257 ff., 271 ff.

Tastsinn zu einer Vorstellung des eignen Leibes, die ihn als ein räumlich Ausgebreitetes erscheinen lässt. Das Auge sieht den Leib und seine Theile, so weit sie ihm zugänglich sind, wie andere äussere Dinge, während es für den Tastsinn einen Unterschied macht, ob die Hand oder sonst ein bewegliches Glied des Tastorgans den eignen Leib oder ein fremdes Object berührt. In jenem Falle entstehen, wie wir wissen, zwei besondere Empfindungen, im andern Falle dagegen hat man nur eine Empfindung, und hierdurch scheidet sich allmälig die Vorstellung des eignen Leibes von der irgend eines äusseren Objects.

Einzelne Empfindungen, von welcher Art sie auch sein mögen, werden ursprünglich nicht localisirt. Rühren sie von Reizen her, die an verschiedenen Stellen des Leibes bewirkt sind, so werden sie in der Seele zwar nicht zu Einer Empfindung verschmelzen, aber auch nicht ohne Weiteres eine Beziehung auf ihre Ursprungsstellen erhalten. Wenn dagegen die Seele durch ganze Complexe von Empfindungen, wie sie das Auge und die bewegliche Hand liefern, räumliche Vorstellungen von den verschiedenen Leibestheilen gewonnen hat, so müssen die einzelnen, nachmals auftretenden, Empfindungen, welche Reizen an bestimmten Stellen des Leibes entsprechen, allerdings auf die letzteren bezogen werden, und zwar insofern als dieselben die Vorstellungen der Glieder, zu denen diese Stellen gehören, reproduciren.

Kommt ein äusseres Object mit dem Leibe in Berührung und sieht man zugleich diesen Vorgang, so wird sich die entstandene Tastempfindung mit der Gesichtsvorstellung der betreffenden Leibesstelle associiren und dadurch eine Beziehung zu der letzteren erhalten, d. h. in dieselbe localisirt werden. Unzählige solcher Vorgänge wiederholen sich an verschiedenen Stellen des Leibes. — Sieht man dagegen zwei äussere Objecte zusammentreffen, so entsteht daraus für uns keine sinnliche Empfindung, die sich mit der Gesichtsvorstellung der sich berührenden Objecte associiren könnte. Dadurch kommt nun auch in die Gesichtsvorstellung des Leibes ein Merkmal, das dieselbe von den Vorstellungen äusserer Objecte unterscheidet*). Wohl aber kann und wird es dem Kinde nach einigen Erfahrungen sehr leicht begegnen, dass selbiges die Empfindung, die wir durch die Berührung eines äussern Objects mit

*) s. W. F. Volkmann, Grundr. d. Psych. S. 224.

unserem Leibe gewinnen, auf das Zusammentreffen zweier fremder Objecte überträgt.

Stellt sich bei der Berührung einer Leibesstelle durch die Hand oder auch durch ein fremdes Object eine Schmerzempfindung ein, so wird diese ebenso durch Vermittelung der Gesichtsvorstellung von dem Gliede auf dasselbe bezogen. Aber auch dadurch kann eine solche Beziehung herbeigeführt werden, dass eine Schmerzempfindung, die Folge einer krankhaften Veränderung eines Leibesgliedes ist, durch die Bewegung des letzteren erst bestimmter hervortritt oder doch in ihrer Intensität merklich gesteigert wird, während die Bewegung der übrigen Glieder dieselbe unverändert lässt. Die Schmerzempfindung wird sich dann mit der bereits erworbenen Vorstellung des betreffenden Gliedes associiren und in derselben eine bestimmte Stelle einnehmen. Da endlich den Bewegungen der meisten Glieder eigenthümliche Muskelempfindungen entsprechen, die mit den Raumvorstellungen dieser Glieder verschmolzen sind, so kann auch durch solche Empfindungen, indem sie bei der Bewegung eines Gliedes hervortreten, die Vorstellung desselben reproducirt werden.

Ist eine bestimmte Empfindung durch Association mit der Raumvorstellung eines Gliedes einmal in das letztere verlegt, so kann diese Association auch nach dem Verluste des Gliedes wirksam bleiben. Hierher gehört die bekannte Erfahrung, dass Amputirte, denen etwa ein Fuss weggenommen ist, den Schmerz, der durch Affection der Nervenfasern des Stumpfes entsteht, noch in dem verlornen Gliede zu empfinden glauben, d. h. es ist ihnen in ihrem Vorstellen so, als ob dieses Glied noch vorhanden wäre, — eine Täuschung, die das ganze Leben hindurch anhalten kann. In ähnlicher Weise wird bei der künstlichen Nasenbildung aus der Stirnhaut, so lange noch eine Verbindung mit den Nerven der Stirnhaut besteht, eine Berührung der neuen Nase anfänglich noch auf die Stirn versetzt oder so empfunden, als ob sie auf der Stirn sässe, bis dieser Irrthum allmälig in Folge einer neuen Association zwischen den Empfindungen der Berührung und der Raumvorstellung der Nase beseitigt wird*).

428. Wenn die Empfindungen, welche von verschiedenen Hautstellen aus erregt werden, sich durch gewisse qualitative

*) s. Hagen im Handwört. der Physiologie von Wagner, Bd II. S. 716.

Nebenbestimmungen voneinander unterscheiden, so wird eine einzelne sinnlich gegebene Empfindung um so sicherer die Vorstellung des gereizten Theiles und damit auch den Ort des sie veranlassenden Reizes reproduciren. Wären aber die Empfindungen, welche beim Hingleiten der beweglichen Tastglieder längs der Oberfläche des Leibes entstehen, durchaus qualitativ gleich, so würden wir zwar immerhin noch von den verschiedenen Theilen des Leibes ein räumliches Vorstellen gewinnen können, nämlich vermöge der qualitativ oder graduell verschiedenen Muskelempfindungen, die mit den Bewegungen der Glieder verbunden sind; allein die bestimmte Localisation der einzeln gegebenen Empfindungen würde dann ohne Beihilfe des Gesichts, also bei Blinden auf grosse Schwierigkeiten stossen, wenn nicht geradezu unmöglich sein. Indem wir durch die Bewegung der Hand und des Arms eine bestimmte Hautstelle erreichen und betasten, ist mit dieser Stellung des Arms und der Hand ein bestimmtes Muskelgefühl verbunden, das uns nachmals leitet, falls wir durch irgend einen Reiz an der betreffenden Stelle zu ihrer Auffindung veranlasst werden. Wir würden jedoch diese Stelle nicht finden können, wenn nicht zuvor der Reiz oder vielmehr die ihm entsprechende Empfindung die Gesichts- oder Tastvorstellung des gereizten Körpertheiles reproducirte. Und hierbei ist es von Bedeutung, dass die Empfindungen, welche den verschiedenen gereizten Hautstellen entsprechen, durch irgend eine qualitative Nebenbestimmung voneinander unterschieden sind. Ist aber die Vorstellung des gereizten Ortes reproducirt, so werden auch die Muskelempfindungen, welche früher während der Bewegung des Tastgliedes nach diesem Orte hin und bei dessen Erreichung entstanden, zur Auffindung desselben dienen können. Bei dem Sehenden tritt nun hier allerdings eine Erleichterung insofern ein, als er früher die Bewegung der Tastglieder nach bestimmten Leibesstellen hin öfter mit den Augen verfolgen konnte.

429. Die im Innern unseres Leibes erregten Empfindungen werden bekanntlich nur sehr unvollkommen localisirt, wie wir denn auch von den inneren Organen, abgesehen von absichtlich oder zufällig erworbenen anatomischen Kenntnissen, keine Gesichts- und Tastvorstellungen besitzen. Zwar werden Kopfschmerzen keinen Zweifel lassen, da sie wohl meist etwas an sich tragen, was die schon bekannte Vorstellung des Kopfes reproducirt, zumal wenn sie durch die Bewegung des letzteren irgendwie modificirt werden.

Dazu gesellen sich noch, auf Grund früherer Erfahrungen, Deutungen des Aeusseren auf das Innere, von denen Hagen*) einige hervorgehoben hat. So können äussere Einwirkungen, wie Druck, Stoss, Schlag, Fallen, die den Kopf treffen und irgendwie auch von anderweitigen (inneren) Empfindungen begleitet sind, Veranlassung geben, diese Empfindungen, wenn sie für sich auftreten, auf eine der äusseren entsprechende innere Stelle zu verlegen. Ebenso hat ein bedeutender Druck, der auf die Bauchgegend ausgeübt wird, ausser dem Gefühl der Berührung der Bauchhaut noch ein anderes im Gefolge, das im Vorstellen nur an eine in der Richtung des Druckes befindliche Stelle in der Tiefe versetzt werden kann. Auf Grund derartiger Erfahrungen werden dann Empfindungen, welche durch die Eingeweide erregt werden, in die Tiefe des Leibes verlegt, jedoch nicht gerade in die Eingeweide selbst, z. B. in die Gedärme, sondern zunächst nur an eine Stelle in der Tiefe, die einer Stelle auf der Bauchhaut correspondirend gedacht wird. Die Localisation der Empfindungen in der Brusthöhle befestigt sich durch den Umstand, dass dieselben während des Athmens, Hustens, Bückens, etc. irgendwelche bemerkbare und auf die Brust zu beziehende Veränderungen erleiden, nachdem die Bewegungen des Athmens und Hustens, die sich auch äusserlich genügend kundgeben, bereits erfahrungsmässig auf das Innere der Brust gedeutet sind.

430. Das Vorstehende (S. 613 f.) bezog sich auf das Localisiren einzeln auftretender Empfindungen in bestimmte Glieder und Stellen des Leibes, zur Zeit, wo die Seele vermittelst des Gesichts- und Tastsinnes bereits gewisse Raumvorstellungen von den verschiedenen Leibesgliedern gewonnen hat. Ferner kann es nun nicht ausbleiben, dass geschlossene Complexe von Lichtempfindungen, die bereits in der Form des Nebeneinander vorgestellt werden, sobald durch die vereinigte Thätigkeit des Gesichts- und Tastsinnes die Auffassungen nach der Dimension der Tiefe hinzukommen, uns die Erscheinungen ausser uns befindlicher Objecte darbieten, denen die Farbenempfindungen selbst als Eigenschaften beigelegt werden. Zu demselben Resultat gelangt in seiner Weise auch der Tastsinn. Ganze Complexe von Tastempfindungen werden als räumlich ausgebreitet vorgestellt, und die einzelnen Tastempfindungen verwan-

*) a. a. O. S. 717.

deln sich in Eigenschaften des Betasteten. Dieses letztere Ergebniss wird theils dadurch herbeigeführt, dass das Betasten verschiedener Flächen wegen ihrer ungleichen Glätte verschiedene Empfindungen veranlasst, theils auch und zwar vornehmlich dadurch, dass hier der Tastempfindung erst eine Reihe von Muskelempfindungen vorausgeht, welche durch die Bewegung des Tastgliedes erzeugt wird. Diese Empfindungen entstehen und bleiben auch dann, wenn die Hand im Raume umherfahrend auf kein Object trifft, während die Tastempfindung kommt oder scheidet, je nachdem die Hand ein Object berührt oder von demselben zurückgezogen wird. Dadurch erhalten nun die Tastempfindungen eine feste Beziehung auf die äusseren Objecte selbst, während die Hand nur noch als ein empfindendes Organ erscheint. Schmerzempfindungen dagegen bleiben mit der Vorstellung eines Leibesgliedes verschmolzen, weil sie meist fortbestehen oder doch nicht sofort verschwinden, nachdem die Berührung des Gliedes mit einem fremden Object aufgehoben ist.

Bemerkenswerth ist hier noch, dass wir die ungleiche Rauhigkeit verschiedener Flächen und die Grösse des Widerstandes auch empfinden können, wenn wir mittelst eines geeigneten Stäbchens auf denselben hin- und herfahren. Stemmt man ein Stäbchen, das man zwischen den Fingern hält, auf eine Tischplatte, so ist es, worauf Fechner aufmerksam gemacht*), so, als ob man zwei Empfindungen an zwei durch die Länge des Stäbchens getrennten Orten hätte. Man empfindet den Druck, der vom Widerstande des Tisches herrührt und sich durch das Stäbchen zum Finger fortpflanzt, und auch die Berührung des letzteren mit dem Stäbchen. Befestigt man das Stäbchen an der Oberfläche des Tisches unbeweglich, so fällt die eine Empfindung, die wir am unteren Ende des Stäbchens zu haben glauben, weg und es bleibt nur die andere Empfindung. Könnten wir aber, bemerkt E. H. Weber, das Stäbchen unbeweglich an unserem Finger befestigen, so würde die Empfindung an der Oberfläche des Fingers wegfallen, und wir würden nur den Druck da zu empfinden glauben, wo das untere Ende des Stäbchens den Tisch berührt. So ist es nun mit den Zähnen, die an ihrem einen Ende unbeweglich in den

*) s. E. H. Weber, Art. Tastsinn in Wagner's Handw. der Physiologie, Bd. III. Abth. 2. S. 484; — auch Lotze, medic. Psych. S. 428 f.

Zahnzellen befestigt sind. Hier empfinden wir einen Druck nur an der freien Oberfläche des berührten Zahnes, und nicht an dem Orte, wo er die nervenreiche Haut der Zelle berührt. Wenn dagegen ein Zahn stark wackelt und sich in seiner Zelle bewegt, so empfindet man nicht nur den gegen seine Oberfläche ausgeübten Druck an dieser selbst, sondern auch noch einen Druck in der Zelle da, wo die letztere von der Wurzel des Zahnes berührt wird.

431. Wie die Lichtempfindungen schon frühzeitig, nachdem das Auge durch den Tastsinn einigermassen erkannt ist, eine Beziehung auf dasselbe erhalten müssen, da sie mit dem Schliessen und Oeffnen des Auges schwinden und kommen oder sonst irgendwie modificirt werden; so werden in ähnlicher Weise auch die übrigen Sinnesempfindungen auf die betreffenden Organe bezogen, also die Geschmacksempfindungen auf die Zunge, die Geruchsempfindungen auf die Nase und die Schallempfindungen auf das Ohr. Die Einrichtung der übrigen Sinne, des Geruchs-, Geschmacks- und Gehörsinnes, ist aber nicht von der Art, dass die Seele die von ihnen gelieferten Empfindungen, gleich den Gesichts- und Tastempfindungen, in räumlicher Weise vorstellen könnte. Allerdings kann die Zunge, als bewegliches Tastwerkzeug, zu einem räumlichen Vorstellen führen, aber man hat die Tastempfindungen derselben von den eigentlichen Geschmacksempfindungen zu unterscheiden, welche letztere als solche die Form des Räumlichen nicht annehmen, wie es denn bekannt ist, dass Reizung der Zunge durch einen galvanischen Strom eine rein intensive Geschmacksempfindung liefert. Nur mittelbar, in Folge der begleitenden Tastempfindungen, kann die Geschmacksempfindung den Schein eines räumlich Ausgedehnten gewinnen. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für die Wärmeempfindungen. Taucht man die Hand in warmes oder kaltes Wasser, so empfindet man wohl die Wärme oder Kälte an allen vom Wasser berührten Stellen und so gewissermassen als etwas Extensives, wie es auch der Fall ist, wenn man die ausgestreckte Hand auf ein kaltes Metall legt oder gegen eine heisse Ofenplatte hält. Die Vorstellung der Hand, als eines räumlich Ausgedehnten, lässt hier auch die Wärme als ein Extensives erscheinen.

Die übrigen Sinnesempfindungen compliciren sich mit den Vorstellungen der Dinge, die wir durch den Gesichts- und Tastsinn als äussere räumlich ausgedehnte Dinge kennen gelernt ha-

ben, und werden insofern auch nach aussen verlegt. Die Geschmacksempfindung erhält nicht allein eine Beziehung auf die Zunge, sondern auch auf die sie berührenden Objecte, und zwar um so mehr, als verschiedene Objecte, die wir durch Auge und Getast als verschiedene erkennen, in Berührung mit der Zunge auch verschiedene Geschmacksempfindungen erregen. — Die Geruchsempfindungen werden auf Objecte bezogen vermöge der wiederholt gemachten Erfahrung, dass diese Empfindungen bei Annäherung der Nase an gewisse Objecte in auffälliger Weise gesteigert werden; daher denn die Geruchsempfindungen ebenso, wie die Geschmacksempfindungen, mit den durch Gesicht und Getast gewonnenen Vorstellungen der Objecte sich compliciren und als Eigenschaften der letzteren gelten müssen. Dabei kommt noch in Betracht, dass die in der Luft verbreiteten Theilchen des Riechstoffes vorzugsweise beim Einathmen der Luft durch die Nase ihre Wirkung auf den Riechnerven üben. Da nun der in die Nase eindringende Luftstrom an ihrem Eingange auch Tastempfindungen erregt, so geben diese durch ihre Association mit den gleichzeitig auftretenden Geruchsempfindungen zur Localisation der letzteren in die Nase Veranlassung. Inzwischen bekommt die Geruchsempfindung auch eine Beziehung auf den in die Nase dringenden Luftstrom selbst, den wir vermittelst der Tastnerven der Nase empfinden, und mit dessen Stärke und Richtung die Intensität jener Empfindung variirt.

432. In ähnlicher Weise wie mit den zuvor besprochenen Sinnesempfindungen verhält es sich mit der Beziehung des Gehörten auf etwas Aeusseres. Zwischen den Gesichts- und Gehörempfindungen bilden sich zahlreiche Complicationen, da die letztgenannten Empfindungen sehr häufig nach einem sichtbaren, den Schall veranlassenden Vorgang, z. B. beim Zusammentreffen zweier Körper, sofort auftreten und sich mit der Gesichtsvorstellung dieses Vorganges associiren. Darum vernimmt man, bemerkt Drobisch*), auch selten ein Geräusch oder einen Ton, ohne an etwas Sichtbares, als an seine Bedingung oder als die ihm zum Grunde liegende Ursache zu denken. In ähnlicher Art bilden sich auch beim Blinden Associationen zwischen den Gehörempfindungen und den Tastbildern äusserer Objecte, wenn er mit der tastenden oder

*) Empirische Psychologie, S. 127.

klopfenden Hand über dieselben hingeht. Verschiedene Objecte werden hierbei, bei sonst gleichem Gebrauche der Hand, verschiedene Gehörempfindungen erregen, und diese daher um so sicherer eine Beziehung auf die betasteten Objecte selbst erhalten. Kommen nun dieselben oder andere ähnliche Gehörempfindungen für sich allein vor, so werden sie doch, in Folge der bereits zahlreich gebildeten Associationen, ihre Beziehung auf gewisse äussere Objecte bewahren.

Die Richtung des Schalles ist zum Theil ebenfalls durch die Gesichtswahrnehmung bedingt, insofern uns diese die Schallquelle in gar vielen Fällen zu erkennen gibt. Dann macht sich auch die Stärke des Schalles geltend, indem man die tönenden Körper dahin setzt, woher die stärksten Schallwellen kommen, was zu mancherlei Täuschungen Anlass geben kann. Da wir in der Regel am deutlichsten hören, wenn das Ohr der Schallquelle gerade zugewendet ist, so verlegen wir die Richtung des Schalles in die Verlängerung des Gehörganges oder in die rückwärts genommene Verlängerung des Eindruckes; und es ist eine Folge hiervon, dass bei jedem Schalle die Oertlichkeit desselben nach der eben bezeichneten Weise als Vorstellung reproducirt wird. Daher irren wir bei reflectirten Schallwellen (Echo), die denselben Eindruck wie die directen machen*). Wichtig zur Bestimmung des Orts tönender Körper ist ferner die stärkere Wirkung des Schalles auf das eine oder andere Ohr. Dreht man den Kopf, so wirkt der Schall auf das eine Ohr stärker als auf das andere, wonach sich leicht die Richtung des Schalles bestimmen lässt. Dies gilt jedoch nur so lange, als die Schwingungen des Trommelfells, vermöge der von aussen kommenden Schallwellen, ungestört von Statten gehen können. Füllt man den äusseren Gehörgang vollständig mit Wasser, wodurch die Schwingungen des Trommelfells verhindert werden, und taucht man dann den Kopf unter Wasser, so glaubt man, wie Ed. Weber fand, den Ort eines im Wasser erregten Schalles im Kopfe selbst zu haben und ein Urtheil über die Richtung dieses Schalles ist nicht mehr möglich. Dagegen empfinden wir den Schall als einen von aussen kommenden Eindruck und unterscheiden deutlich, ob er von rechts oder von links kommt, wenn das Trommelfell, während wir uns unter Wasser befinden, noch von

*) s. Drobisch a. a. O. S. 128 f.

Luft umgeben und daher wirksam ist. Aber auch die Erregung der Tastnerven der Ohrmuschel und des Gehörganges durch die Schallwellen sind für die Kenntniss der Richtung des Schalles von Bedeutung. So soll nach den Versuchen von Ed. Weber*) das Vor und Hinten, sowie das Oben und Unten durch Vermittelung der Ohrmuschel unterschieden werden, während sich die Beziehungen des Rechts und Links mittelst des Trommelfells herausstellen. Legt man die Ohrmuscheln durch ein Band glatt an den Kopf und drückt die Hände vor dem äusseren Gehörgange fest auf die Wangen, dergestalt, dass dieselben einen die Stelle der Ohrmuschel vertretenden Schirm bilden, so scheint uns bei verschlossenen Augen ein von vorn kommender Schall von hinten und ein von unten kommender Schall von oben zu kommen und umgekehrt. — Wie also beim Gesichtssinne die Beziehungen des Rechts und Links, des Oben und Unten nicht unmittelbar durch die Affectionen des Sehnerven, sondern durch gewisse begleitende Nebenempfindungen bewirkt werden, so liegen auch diese Beziehungen beim Gehörsinn nicht unmittelbar in den durch den Gehörnerven herbeigeführten Empfindungen, sondern in gewissen die letzteren begleitenden Nebenwirkungen von der bezeichneten Art.

Die Entfernung der Schallquelle beurtheilt man gewöhnlich nach der Stärke des Schalles. Bei bekannten Tönen, z. B. den Lauten der menschlichen Stimme, hat sich mit einer gewissen Entfernung der schallerregenden Ursache die Vorstellung einer gewissen Stärke des Schalles verbunden, und so auch umgekehrt. Diese Association zwischen Stärke und Entfernung des Schalles führt dann auch wieder zu Täuschungen, indem z. B. eine gedämpfte Stimme die Vorstellung einer grösseren Ferne reproducirt, ein Umstand, der im Verein mit den Täuschungen über die Richtung des Schalles von der Kunst des sog. Bauchredens benutzt wird.

433. Durch solche Complicationen der Gesichts- und Tastvorstellungen mit den übrigen Sinnesempfindungen erscheinen uns also auch diese als Eigenschaften der vorgestellten Dinge. So gibt jeder abgeschlossene Complex von Gesichtsempfindungen, der mit den übrigen Sinnesempfindungen complicirt ist, ein räumliches Ding mit mehreren sinnlichen Merkmalen, das so, wie es uns erscheint, nur ein Erzeugniss unserer Seele ist, freilich durch Ver-

*) Berichte der Sächs. Ges. der Wiss. in Leipzig, 1851. S. 29 ff.

mittelung der Sinnesorgane und auf Veranlassung eines wirklich existirenden äusseren Dinges. Auch hängt die Eigenthümlichkeit der Sinnesempfindung von einer gewissen Eigenthümlichkeit des wirklichen äusseren Dinges ab, so die Farbenempfindung von einer Gruppirung der kleinsten Theilchen, welche es mit sich bringt, dass dasselbe aus dem auffallenden Lichte solche Aetherwellen aussondert, die zur Entstehung der betreffenden Farbenempfindung Anlass geben. Diese Farbenempfindung erscheint uns dann in unserem Vorstellen als eine Eigenschaft des Dinges, von welchem die sie veranlassenden Aetherwellen herkommen, obschon dieselbe nur ein innerer Zustand der Seele ist, welcher durch die Qualität der letzteren und durch den Erregungszustand des von der Aetherwelle afficirten Sehnerven bedingt ist. Man erkennt, dass die sinnlichen Eigenschaften, die wir in unserem gewöhnlichen Vorstellen den Dingen zuschreiben, denselben objectiv nicht zugehören, und dass die Eigenthümlichkeiten der Dinge, von denen die Sinnesempfindungen abhängen, nicht mit den letzteren sofort ins Bewusstsein fallen, sondern nur auf dem Umwege wissenschaftlicher Untersuchung erkannt werden können.

434. Wenngleich nun die Empfindungen der Seele, wie auch die ihnen vorausgehenden Reizzustände der Nerven gewiss etwas anderes als blosse Bewegungszustände sind, so ist es doch wahrscheinlich, dass sie durch eine Bewegung und zwar durch eine oscillatorische Bewegung innerhalb der Nerven veranlasst werden. Wir wollen nun hier, gestützt auf gewisse physikalische Principien, noch einige Betrachtungen über die Entstehung der Sinnesempfindungen, insbesondere der Farbenempfindungen, anstellen.

Wenn mehrere Elemente (Atome) miteinander in Wechselwirkung stehen und zusammen ein kleinstes Massentheilchen (Molecül) der Materie constituiren, so verharren sie gewiss nicht gleichgiltig nebeneinander, sondern sind vielmehr in einer gewissen Thätigkeit gegeneinander begriffen. Jedes Element wirkt gegen das andere und ist rückwärts dessen Einwirkung ausgesetzt. Diese Action und Reaction eines jeden Elements ist ein innerer Zustand desselben, der theils von seiner eigenen Qualität, theils auch von der Qualität der übrigen Elemente abhängt. Nun bestehen bekanntlich die Molecüle der organischen Körper, namentlich auch die der Nervenfasern, aus einer sehr grossen Anzahl von Atomen

verschiedenartiger Stoffe. So die eiweisshaltigen Stoffe, die in den Nerven vorkommen, aus Sauerstoff, Wasserstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor. Auch müssen wir uns jedes der einzelnen Atome, die zusammen ein Nervenmolecül constituiren, sowie auch das letztere selbst von einer Aethersphäre umschlossen denken, da die Nervenfasern alle die physikalischen Erscheinungen, und darunter auch elektrische Strömungen, darbieten, um derenwillen wir zur Annahme des Aethers genöthigt werden.

Indem nun die sämmtlichen ein Nervenmolecül constituirenden Elemente in gegenseitiger Action und Reaction begriffen sind, inhärirt jedem dieser Elemente ein System innerer Zustände, für welches ein bestimmtes Gleichgewicht besteht, sofern zwischen den einzelnen Elementen selbst ein bestimmtes Gleichgewichtsverhältniss eingetreten ist. Jede Nervenfaser ist aber ein Aggregat solcher Molecüle, die in bestimmter Weise miteinander verbunden und nebeneinander gelagert sind.

Werden nun die Atome der peripherischen Molecüle durch eine äussere Einwirkung aus ihrer Gleichgewichtslage verrückt, so ändert sich mit dem System der gegenseitigen Action und Reaction der Atome auch das System der inneren Zustände eines jeden; es wird jetzt ein bestimmter innerer Zustand auftreten, der während der Fortpflanzung der Bewegung von Molecül zu Molecül längs der Axenfaser bis zum Centralorgan fortgepflanzt wird und hier die Seele ebenfalls in einen ihrer Qualität entsprechenden bestimmten inneren Zustand versetzt, der dann eben die durch den äusseren Reiz veranlasste Empfindung ist.

435. Angenommen nun, bestimmte Aetherwellen versetzen die Atome einer gewissen Retinaschicht des Auges in einen Schwingungszustand bestimmter Art; dann wird mit dem letzteren in den Atomen der Sehnerven ein bestimmter innerer Zustand hervortreten, der bis zur Seele fortgepflanzt in dieser eine bestimmte Farbenempfindung auslöst, die auch nach Wegfall des äusseren Eindruckes noch einige Zeit mit sinnlicher Klarheit fortbestehen kann, wenn die sie veranlassenden Schwingungen im Sehnerven noch eine Zeitlang andauern. Während aber durch Einwirkung der Aetherwellen aus dem System der inneren Zustände in den Elementen des Sehnerven ein bestimmter innerer Zustand hervortritt, wird wahrscheinlicher Weise ein bestimmter anderer innerer Zu-

stand oder die Resultante aus jenen Zuständen, die in dem betreffenden Systeme mit dem bestimmten Hervortreten eines Zustandes übrig bleiben, zurückgedrängt werden. Dieser andere innere Zustand wirkt nun auf die Wiederherstellung des anfänglichen dynamischen Gleichgewichtsverhältnisses aller inneren und äusseren Zustände der Sehnervenelemente, wie es vorhanden ist, wenn der Sehnerv von aussen ungereizt der Selbstthätigkeit aller seiner Atome überlassen ist, — ein Verhältniss, welchem die Empfindung des Schwarzen entspricht. So wird sich nun der zurückgedrängte innere Zustand, den wir mit *c* bezeichnen wollen, neben dem von aussen veranlassten Zustande *a* geltend zu machen suchen, und zwar um so bestimmter, je mehr er in Folge der Störung jenes Gleichgewichtsverhältnisses in Spannung gesetzt ist. Unmittelbar hiermit zusammen hängt das, was man die Abstumpfung (Ermüdung) des Organs für einen äusseren Farbeneindruck nennt. Dieselbe ist eben darin begründet, dass der Zustand des Organs, welchem eine bestimmte, von aussen angeregte, Farbenempfindung entspricht, nicht über eine gewisse Grenze hinaus andauern kann, da eine Ursache vorhanden ist, die beständig auf Abänderung dieses Zustandes dringt. Der oben mit *c* bezeichnete Zustand möchte nun wohl die complementäre Farbenempfindung veranlassen, die beim Anschauen einer farbigen Fläche zugleich mit der primären Empfindung sich geltend zu machen sucht und sofort mit bestimmter Klarheit hervortritt, wenn man das Auge dem primären Eindruck durch vollständiges Verschliessen entzieht, oder auf eine weisse Fläche richtet (s. S. 476 f.). Im letzteren Falle wird der Wellenzug, der als sog. weisses Licht die Retina trifft, diese nicht so afficiren können, wie da, wo dieselbe nicht zuvor durch den Eindruck einer bestimmten Aetherwelle erregt ist; vielmehr wird die Farbenempfindung hervortreten müssen, zu welcher die Seele in Folge des besonderen Erregungszustandes des Sehnerven disponirt ist, d. h. die Farbenempfindung, welche dem Zustande *c* entspricht. Und in diesem Sinne können wir auch nach gewohnter Weise sagen, dass die Retina, wenn sie durch anhaltendes Wahrnehmen einer bestimmten Farbe für diese abgestumpft ist, bei nun einfallendem (alle Farben enthaltendem) weissem Lichte nur für diejenigen Farbestrahlen empfänglich sein wird, welche die betrachtete Farbe zu Weiss ergänzen.

436. Ist der primäre Eindruck sehr intensiv, so wird auch der begleitende Zustand *c* sich um so intensiver geltend zu machen streben, und es kann geschehen, dass dieser Zustand, nach Wegfall des äusseren Eindruckes, sofort auch den ihm selbst entsprechenden äusseren Zustand des Sehnerven hervorruft, d. h. die Elemente des letzteren in solche Schwingungen versetzt, wie sie hervortreten würden, wenn auf die Retina derartige Aetherwellen wirkten, welche den innern Zustand *c* herbeiführen können. Dann wird im Bewusstsein ein positives complementär farbiges Nachbild hervortreten. Allein der Schwingungszustand der Sehnervenelemente, welcher dieses Nachbild bewirkt, kann auch nur ein vorübergehender sein. Wie vorher mit dem von aussen erregten Zustande *a* der Zustand *c* verknüpft war, so ist jetzt dieser mit jenem verbunden, welcher letztere, *a*, wieder den ihm entsprechenden Schwingungszustand hervorzubringen sucht. Indem nun der Schwingungszustand, der dem inneren Zustande *c* entspricht, abnimmt, tritt *c* selbst im Bewusstsein zurück. Der Uebergang dieses Schwingungszustandes in den anderen, der dem inneren Zustande *a* entspricht, muss aber durch eine Pause bezeichnet sein, worin beide Zustände sich zur Indifferenz im Gehirn und Bewusstsein ausgleichen. Alsdann wird mit dem Zustande *a*, in Bezug auf den primären Eindruck, ein positiv identisch gefärbtes Nachbild auftreten. Und dieser Wechsel kann sich mehrmals wiederholen. Je schwächer aber, mit der allmäligen Rückkehr zum Gleichgewichte, die Intensität der Erregungszustände und der entsprechenden Schwingungszustände der Sehnervenelemente wird, desto weniger wird es auch dem Zustande *c* möglich sein, den ihm zugehörigen Schwingungszustand zu bewirken. Derselbe wird schliesslich nur noch als innerer Zustand auftreten können und die ganze Erscheinung mit einem negativen complementär farbigen Nachbilde ausklingen lassen.

So beruht also das negative complementär farbige Nachbild auf einem mit dem primären Farbeneindrucke gleichzeitig auftretenden und mit dessen Dauer sich steigernden inneren Erregungszustande *c*, der zwar das ursprüngliche dynamische Gleichgewichtsverhältniss im Sehnerven wiederherzustellen sucht, ohne jedoch vorher den ihm selbst entsprechenden Schwingungszustand herbeizuführen, während das positive complementär farbige Nachbild, welches nach einem stärkeren primären Lichteindrucke vor dem negativen Nachbilde auftritt, durch den qualitativ gleichen Erregungszustand *c*

in der Art bewirkt wird, dass derselbe sofort den ihm entsprechenden Schwingungszustand der Sehnervenelemente zu Stande bringt.

Es ist zu erwarten, dass der zuvor entwickelte Vorgang sich am reinsten herausstellen wird, wenn der primäre Farbeneindruck ein homogener ist. So erhielt Brücke, wie wir bereits früher (S. 488) angeführt haben, nach Einwirkung eines intensiven homogenen Lichtes, zunächst und fast unmittelbar beim Erlöschen des primären Lichteindruckes, ein meist momentanes positives complementär farbiges Nachbild, hierauf eine Pause, dann ein positiv identisch gefärbtes Nachbild, dann ein negatives complementär gefärbtes, welches wieder einem positiv identisch gefärbten Platz machte. Dieser Wechsel wiederholte sich, nach Umständen, mehr oder weniger oft, dann blieb das positive identisch gefärbte Bild aus, indem nur noch das negative complementär gefärbte gesehen ward, bis endlich auch dieses gänzlich verschwand.

Ist der primäre Farbeneindruck nicht homogen, sondern ein gemischter, namentlich ein weisser, also der die Retina treffende Wellenzug ein zusammengesetzter, so lassen sich in demselben verschiedene Componenten unterscheiden, denen im Sehnerven eben so viele Erregungszustände entsprechen werden. Die letzteren werden dann nacheinander, je nach ihrer Intensität und der Art und Weise, wie dieselbe wächst und abnimmt, zu verschiedenen subjectiven Farbenempfindungen Anlass geben und dasjenige Phänomen bewirken, welches wir unter dem Namen des Abklingens der Farben kennen gelernt haben. Dass die Farbenfolge des Abklingens bei verschiedenen Personen eine verschiedene ist, kann wohl nicht befremden, wenn man erstlich bedenkt, dass das dynamische Gleichgewichtsverhältniss der Sehnervenelemente, welches dem von aussen ungereizten Sehorgane entspricht, wohl nicht bei allen Personen dasselbe sein kann, wenn auch die hier stattfindenden Differenzen innerhalb enger Grenzen liegen mögen, und zweitens hinzunimmt, dass selbst die zufälligsten Umstände während des Versuches das Hervortreten einer gewissen Farbe begünstigen oder auch hemmen können, ganz abgesehen davon, dass etwa das Experiment nicht mit der nöthigen Sorgfalt und Ausdauer angestellt wird.

437. Den psychologischen Betrachtungen dieses Kapitels liegt die Annahme eines einfachen Seelenwesens zum Grunde

(S. 556 f.), zu der wir jedoch nicht willkürlich, sondern auf regressivem (analytischem) Wege gelangten. Und diese Annahme wird sich wohl um so mehr als wissenschaftliches Erklärungsprincip geltend machen, je mehr man in exacter Weise die Gesammtheit der psychischen Erscheinungen einer strengen Analyse unterwirft, wie denn auch von Solchen, die sich unbefangen und zur Genüge mit den verschiedenen psychologischen Erklärungsversuchen bekannt gemacht haben, nicht wohl geleugnet werden kann, dass sich die Annahme eines einfachen Seelenwesens schon durch seine Fruchtbarkeit in Hinsicht auf die Erklärung der mannigfachsten psychischen Erscheinungen bewährt hat. Freilich fehlt es hierbei nicht an Schwierigkeiten, die sich erheben, wenn man nach dem Sitze der Seele und nach der Entstehung der verschiedenen Sinnesempfindungen fragt. Allein diese Schwierigkeiten scheinen doch nicht von der Art zu sein, dass man um ihretwillen genöthigt wäre, die Annahme eines einfachen Seelenwesens schlechthin fallen zu lassen, und sind noch keineswegs beseitigt, wenn man von dieser Annahme absieht und sich andern entgegenstehenden Ansichten hingibt.

Allerdings muss die einfache Seele irgendwo im Gehirn ihren Sitz haben, und auch mit einer gewissen Hirnpartie in näherer Wechselwirkung stehen, während man sonst sagen kann, dass sie vermittelst des Nervensystems allenthalben im Körper gegenwärtig ist. Gesetzt nun, die verschiedenen Sinnesnerven mündeten mit ihren centralen Endigungen in eine Hirnmasse, — die man sich mehr oder weniger gross denken mag, — ohne doch hier miteinander in unmittelbare Verbindung zu treten. Dann werden sich hier die Erregungszustände der verschiedenen Sinnesnerven verbreiten und die daselbst verweilende Seele zu verschiedenen Reactionen, d. h. zu verschiedenen Empfindungen veranlassen. Die Verbreitung der Erregungszustände mag aber in dieser Hirnmasse dadurch geschehen, dass die oscillatorische Bewegung in den Sinnesnerven sich innerhalb derselben fortpflanzt. Dabei ist an eine Verschmelzung der verschiedenen Reizzustände zu einer einzigen Resultante wohl nicht zu denken. Reflectiren wir z. B. auf die Gesichts- und Gehörempfindungen, so werden die Erregungszustände des Sehnerven, die den Farbenempfindungen zu Grunde liegen, durch Aetherwellen, dagegen die Reizzustände des Gehörnerven, die zu den Tonempfindungen führen, durch Schallwellen veranlasst. Nun könnten die Atome des Seh-

nerven durch die transversal schwingenden Aethertheilchen in transversale, die des Gehörnerven aber durch die Schallwellen in longitudinale Schwingungen versetzt werden; — ein Unterschied, der auch in Hinsicht auf die Modification des Systems der inneren Zustände, welches dem Seh- und Gehörnerven zukommt, eine Verschiedenheit mitführen möchte. Doch wollen wir hierauf kein Gewicht legen. Bedeutungsvoller erscheint uns der naheliegende Umstand, dass durch die feinen Aetherwellen wahrscheinlich die Atome der Sehnervenmoleeüle, dagegen durch die viel grösseren Schallwellen die kleinsten aus einer gewissen Anzahl von Atomen bestehenden Massentheilchen des Gehörnerven in Schwingungen versetzt werden. Das System der inneren Zustände kann dann im Sehnerven nicht auf gleiche Weise wie im Gehörnerven modificirt werden. Beide Sinnesnerven werden verschiedene Erregungszustände zu der betreffenden Gehirnmasse fortpflanzen, und wenn auch hier jene verschiedenen Schwingungszustände sich allseitig fortpflanzen, also einmal von Seiten des Gehörnerven Schwingungen kleinster Massentheilchen, welche alle in den letzteren enthaltenen Atome gleichmässig und in demselben Sinne treffen, und zugleich von dem Sehnerven aus Schwingungen der einzelnen Atome, so ist doch eine gemeinsame Resultante dieser verschiedenen Bewegungszustände und der ihnen entsprechenden Reizzustände keinenfalls zu erwarten. Wollte man hier eine solche Resultante annehmen, so würde auch ein Körper auf Grund verschiedener Schwingungszustände seiner Theilchen nicht zugleich Schall- und Wärmewellen aussenden, und überdies auch noch elektrische Erscheinungen darbieten können, während man doch auf dem heutigen Standpunkte der Physik fast allgemein annimmt, dass die Wärmestrahlen, oder überhaupt die Aetherwellen, welche von einem Körper kommen, durch Schwingungen seiner Atome, dagegen die Schallwellen desselben durch Schwingungen seiner Massentheilchen bewirkt werden. Findet nun aber in der besagten Gehirnmasse eine solche Resultante nicht statt, so wird auch die Seele durch die verschiedenen Reizzustände, gegen welche sie zu reagiren hat, zu verschiedenen Sinnesempfindungen veranlasst werden.

438. Indessen lassen sich die verschiedenen Erregungszustände in Rücksicht der genannten Sinnesnerven auch noch auf einem etwas anderen Wege entstanden denken. Man könnte nämlich annehmen, dass die Aetherwellen, wie überhaupt alle

äusseren Einwirkungen auf die Retina, nur die Aetherelemente, welche die Kernatome des Sehnerven einhüllen, in Schwingungen versetzen, die sich dann auch in der betreffenden Gehirnmasse nur auf die hier vorhandenen Aetherelemente erstrecken würden, während dagegen Einwirkungen auf das Gehör, insbesondere die Schallwellen, die kleinsten Molecüle des Gehörnerven und weiterhin die des Gehirns zu einer schwingenden Bewegung bringen. Auch die übrigen Sinnesnerven werden, in Folge der Verschiedenheit ihrer peripherischen Endigungen und der Art und Weise, wie äussere Einwirkungen dieselben afficiren, in Bewegungs- und Reizzustände gerathen, von denen nicht anzunehmen ist, dass sie in der Gehirnmasse, worin die Seele verweilt, zu einer Resultante verschmelzen werden. Grössere Bedenklichkeiten könnten vielleicht entstehen, wenn man auf den Fall reflectirt, wo zwei differente Netzhautstellen gleichzeitig von verschiedenen Farbestrahlen, d. h. durch Aetherwellen von verschiedener Schwingungsdauer afficirt werden. Hier möchte man vielleicht meinen, dass die verschiedenen Erregungszustände, die sich gleichzeitig durch verschiedene Fasern des Sehnerven zu jener Gehirnmasse fortpflanzen, in dieser zu einer Resultante verschmelzen müssten, in gleicher Weise, wie dies geschieht, wenn verschiedene Aetherwellensysteme gleichzeitig dieselbe Netzhautstelle treffen, und also die hier erregten Reizzustände sich derselben Nervenfaser mittheilen. Allein es ist zu bedenken, dass hier die Mischung der Aetherwellen schon in der Retina selbst geschieht, und der entsprechenden Nervenfaser eine Resultante aus verschiedenen Erregungszuständen zugeführt wird. Jedenfalls muss es einen Unterschied machen, ob verschiedene, aber sonst ähnliche Schwingungszustände, die sich zu einer Resultante vereinigen können, die bezeichnete Gehirnmasse an derselben Stelle oder an verschiedenen Stellen treffen. Im letzteren Falle ist es sehr wohl denkbar, dass sich die verschiedenen Schwingungs- und die ihnen entsprechenden Reizzustände nach gewissen Richtungen hin in ihrer Eigenthümlichkeit behaupten. Es liegt keine Nothwendigkeit vor, dass verschiedene Schwingungszustände der bezeichneten Art, die sich in einem Medium von verschiedenen Punkten aus verbreiten, überall zu einer Resultante zusammenfallen müssen. Sodann kann das Auge noch, wenn es an verschiedenen Retinastellen von zwei farbigen Objecten gereizt wird, diese im raschen Nacheinander der empfindlichsten Stelle der Retina zuwenden und daher auch die ent-

sprechenden Reizzustände nacheinander in gesteigerter Intensität der Seele zuführen. Wird endlich die Retina an verschiedenen Orten von ganz homogenen Aetherwellen getroffen, so wird, nach unserer Ansicht, allerdings aus sämmtlichen Reizzuständen nur eine einzige intensive Empfindung in der Seele resultiren, falls dies nicht durch gewisse Bedingungen, von denen bereits ausführlicher die Rede war, verhindert wird.

439. Bei der Annahme eines einfachen Wesens, als Träger der psychischen Erscheinungen, ist der Gedanke fern zu halten, als ob es einen einfachen oder doch ungemein kleinen Theil im Gehirn geben müsse, von dem alle Nerven auslaufen und in dem alle Nerven zusammenlaufen, und zweitens der Gedanke, dass es eine einzige Verbindungsfaser zum Seelensitze und eine Fähigkeit der Seele geben müsse*), das, was in einer solchen Faser verchmolzen anlangt, zu trennen. Ein solches Vermögen halten wir für schlechthin unmöglich. Die Seele kann nur gegen bestimmte Reizzustände, die ihr von Seiten gewisser Nervenelemente zugeführt werden, ihrer Qualität gemäss reagiren, und ihre Reactionen werden verschiedene sein, wenn es die Reizzustände sind, die sie afficiren. Jener Ort aber, worin alle Nerven aus- und zusammenlaufen sollen, kann doch als Vereinigungsort sämmtlicher Nerven kein punktueller sein, der etwa mit dem punktförmigen Sitze der Seele zusammenfiele; daher nicht wohl abzusehen ist, was die Annahme eines einfachen Seelenwesens durch die Annahme eines solchen Vereinigungsortes aller Nerven sonderlich gewinnen könnte. Vielmehr denken wir uns, dass die Seele im näheren Causalverhältniss mit einer ausgedehnteren Hirnpartie steht, welcher allerdings die verschiedenen Nerven ihre Reizzustände mittheilen müssen (S. 627 ff.), wenn diese Zustände zur Seele gelangen sollen, und welcher auch die letztere Reizzustände mitzutheilen hat, damit sie von derselben auf gewisse motorische Nerven übertragen werden. Ob und welche Gliederung innerhalb dieser Gehirnmasse vielleicht bestehen mag, lassen wir hier dahingestellt. Nichts nöthigt uns aber, diese Hirnpartie möglichst klein anzunehmen; sie kann vielmehr eine nicht unbeträchtliche Ausdehnung haben. Und ebenso wenig finden wir nöthig, der Seele einen festen, unveränderlichen Sitz im Gehirn zuzuschreiben. Es ist sehr wohl möglich, dass sie sich in demselben zwischen gewissen

*) s. Fechner, Elemente der Psychophysik, Th. II. S. 414.

Grenzen hin- und herbewegt, und insofern können wir auch von einem ausgedehnten Seelensitze sprechen. Bekannt ist, dass schon Herbart*) die Wahrscheinlichkeit einer solchen Beweglichkeit der Seele ausgesprochen hat. „Das Causalverhältniss zwischen Leib und Seele kann entweder ganz oder doch grösstentheils unverändert bleiben, wenn schon der Seele eine (ihr freilich gänzlich unbewusste) Beweglichkeit zugeschrieben wird; indem ihr innerer Zustand nicht von denjenigen Elementen allein abhängt, von welchen sie in jedem Augenblicke zunächst umgeben ist, sondern auf eine sich gleichbleibende Weise von dem ganzen Systeme, dessen einfache Bestandtheile einander ihre innern Zustände gegenseitig bestimmen." Kaum aber bedarf es der Bemerkung, dass eine solche Bewegung der Seele, wenn sie stattfindet, keine willkürliche ist, sondern die inneren Zustände der Seele, verbunden mit denen des Gehirns, werden erst die Ursache, dann die Folge des veränderten Orts sein, da die äusseren und inneren Zustände der Elemente einander überall gehörig entsprechen müssen.

In ganz natürlichem Zusammenhange hiermit steht nun der Gedanke, dass die Seele, wenn die mit ihr im nächsten Causalverhältniss stehende Gehirnmasse eine bedeutende Störung erfährt, über die ihr im normalen Zustande des Gehirns zukommenden Grenzen ihrer Beweglichkeit hinausgetrieben und selbst zum Uebergange in andere Gehirntheile genöthigt werden kann. Indessen mag von der bezeichneten Masse immerhin ein Theil ausser Wirksamkeit treten können, ohne darum das Wirken der Seele innerhalb dieser Masse vollständig aufzuheben. So lange die Seele noch durch irgend welche Nervenelemente mit irgend welchen Sinnes- und motorischen Nerven im Causalzusammenhange steht, wird sie auch noch gegen gewisse äussere Einwirkungen reagiren und auf Grund ihrer eigenen inneren Zustände nach Aussen wirken können; und in dieser Beziehung ist auch eine bis zu gewissen Grenzen reichende Vertretung gewisser Gehirntheile durch andere mit der Annahme eines einfachen Seelenwesens keineswegs unvereinbar.

440. Betrachtet man den Träger der psychischen Thätigkeiten als ein einfaches Wesen, so schliesst dies keinenfalls die

*) Psychologie als Wissenschaft, etc. Th. II. S. 460 ff.

Forderung in sich, dass das Verweilen der Seele im diesseitigen Leben auf die Erhaltung eines kleinsten Gehirntheiles beruhe.

Flourens*) fand im verlängerten Marke (medulla oblongata) eine Partie grauer Gehirnmasse, etwa von der Grösse eines Stecknadelknopfes, durch deren Zerstörung oder Entfernung nach seiner Mittheilung das Leben sicher aufgehoben werden soll; daher er diesen Gehirntheil den Lebensknoten (noeud vital oder point vital) nennt. Wenn man, wie Flourens angiebt, diese Hirnpartie durchschneidet oder einen kleinen Troikar so in das verlängerte Mark einsticht, dass der Lebensknoten durch einen, denselben umschreibenden, kreisförmigen Einschnitt vom übrigen verlängerten Marke getrennt wird, so soll das dieser Operation unterworfene Thier plötzlich zu Boden fallen, indem der Athem, und mitunter auch die Herzbewegung, sofort zum Stillstande kommt. Das Thier ist todt, fast ohne Convulsionen und Agonie, wogegen Einschnitte vor und hinter diesem Knoten noch Lebenserscheinungen, wie das Athmen und den Herzschlag, fortbestehen lassen. Doch soll nach Versuchen von Brown Sequard bei verschiedenen Thieren noch eine gewisse Summe von Lebenserscheinungen, darunter auch Athmen und Herzbewegung, einige Zeit erhalten bleiben, wenn man den sogenannten Lebensknoten mit einem langsam geführten Schnitte, wodurch eine plötzliche starke Reizung dieser Stelle des verlängerten Markes vermieden wird, herausschneidet.

Gesetzt aber, die Angaben Flourens' ständen unumstösslich fest, so würde sich immer noch die Vermuthung darbieten, dass die Verletzung der als Lebensknoten bezeichneten Gehirnpartie nur mittelbar den Tod herbeiführe. Und wenn auch wirklich Stockung des Athems und der Herzbewegung unmittelbar die Folge einer Verletzung des sog. Lebensknotens wäre, so könnten wir doch, von unserm Standpunkte aus, noch nicht sofort aus diesem Factum schliessen, dass die einfache Seele in dieser Hirnpartie ihren Sitz haben müsse, sondern würden eher vermuthen, dass ein Gehirnorgan, durch welches so unmittelbar der Process

*) Recherch. expér. 1842. p. 204. Comptes rendus etc. 1851. XXXIII. p. 437, XLVII. p. 803. Compt. rend. 1859. XLVIII. p. 136. Hier nach Fechner's Psychophysik, Th. II. S. 400 f.

des Athmens und der Herzbewegung bedingt ist, nicht gerade ein sehr geeigneter Sitz für den Träger des psychischen Lebens sein möchte, und zwar um so weniger, je mehr dasselbe der Erhaltung des leiblichen Lebens vorsteht. Nach unserer Ansicht ist die Seele nicht das Lebensprincip des thierischen Leibes, vielmehr sehen wir den Fortbestand des leiblichen Lebens wie das Verweilen der Seele im Leibe durchaus geknüpft an die Integrität und das Causalverhältniss aller Theile des Leibes, natürlich an die Integrität einiger Theile mehr als an die anderer Theile. Und so ist uns auch das Erlöschen des leiblichen Lebens nicht eine Folge des Fortganges der Seele, sondern umgekehrt: die Seele trennt sich vom Leibe, nachdem dieser gestorben ist. Könnte die Seele irgendwie, ohne Verletzung wesentlicher Lebensorgane, aus einem thierischen Leibe entfernt werden, so möchte immerhin das leibliche Leben desselben noch in gewisser Weise fortbestehen. Freilich bewusste Vorstellungen würde es in einem solchen Organismus nicht geben und eben so wenig könnten von demselben willkürliche Bewegungen bewirkt werden.

441. Man hat durch Verletzung oder völlige Hinwegnahme verschiedener Gehirntheile zu ermitteln gesucht, welche Bedeutung dieselben für das Seelenleben haben möchten. So fand sich unter anderem, dass Vögel (Tauben) nach Exstirpation der Grosshirnlappen noch gewisse, dem Anscheine nach psychische Reactionen äussern, insofern sie nach heftigem Geräusch zusammenfahren, nach Lichteindrücken noch das Auge schliessen, u. dgl. Ob nun in diesem Falle mit den Grosshirnlappen auch die Seele exstirpirt ist, kann nicht behauptet werden; und ist sie noch vorhanden, so bieten die bezeichneten Reactionen, wenn es psychische sind, gerade nichts Auffallendes. Aber wer weiss, ob diese Reactionen wirklich psychische Reactionen sind, also die noch etwa stattfindenden Sinnesperceptionen bewusste Vorstellungen, und die beobachteten Bewegungen des Thieres in der That willkürliche Bewegungen? Fragt doch selbst Ludwig*), der sonst keineswegs der Annahme eines einfachen Seelenwesens zugethan ist, in Bezug auf den vorliegenden Fall: Warum ist zur Erzielung dieser Bewegungen Empfindung nöthig? Warum sind das nicht complicirte Reflexbewegungen?

*) Lehrb. der Physiologie. 1858. Bd. I. S. 607.

Wenn die Retina einer in der bezeichneten Weise behandelten Taube noch durch einen äussern Lichteindruck afficirt werden kann, dergestalt, dass sich ganz so oder ähnlich wie im normalen Zustande gewisse Reizzustände durch die Fasern des Sehnerven fortpflanzen, so werden auch in dem Centraltheil, in welchen die Fasern zunächst einmünden, noch Erregungszustände entstehen, die auch, ohne vorher die Seele getroffen zu haben, sich auf gewisse motorische Nerven übertragen und vermittelst der letzteren eine Schliessung des Auges bewirken mögen. Und in ähnlicher Weise mag es sich mit jenen Bewegungen verhalten, welche das genannte Thier auf Veranlassung eines äusseren Geräusches kundgiebt. Derartige Reactionen könnten nun auch noch erfolgen, wenn wir annehmen, was vielleicht nicht angenommen werden darf, dass nämlich durch die Exstirpation eines gewissen Gehirntheiles die Seele selbst aus dem Gehirne entfernt sei.

Andere hierher gehörige Erfahrungen *), die man in Hinsicht auf die Bedeutung verschiedener Gehirntheile für die Seelenthätigkeit gesammelt hat, können es vielleicht höchst unwahrscheinlich finden lassen, dass im Gehirn eine punktförmige Vereinigung aller Nerven existire, allein sie beweisen nichts gegen die Existenz eines einfachen Seelenwesens.

Vermögen wir nun die Gehirnpartie, mit welcher die einfache Seele in nächstem Causalzusammenhange steht, nicht bestimmt anzugeben, so kann dies doch nicht der Annahme einer einfachen Seelensubstanz entgegengehalten werden; denn auch da, wo man entgegengesetzten Ansichten zugethan ist, findet man auf die Frage nach dem eigentlichen Sitze der psychischen Erscheinungen keine bestimmte Antwort.

412. Wir kehren zu einem Satze zurück, von dem wir im Hinblick auf den Träger des geistigen Lebens zu Anfang dieses Kapitels ausgingen, und der dahin lautet, dass aus blossen Bewegungszuständen von Atomen oder grösseren Massentheilchen, die aus Atomen bestehen, die psychischen Erscheinungen keinenfalls resultiren können. Bei eingehender Erwägung dieser Erscheinungen wird man sich immer wieder genöthigt finden, neben den äusseren Zuständen (resp, Bewegungsverhältnissen) auch auf die

---

*) s. R. Wagner, Götting. gelehr. Anz. 1860. Nr. 6. S. 55.

inneren Zustände der Elemente oder Atome zu reflectiren. Wir fanden, dass, wenn eine gewisse Anzahl von Elementen miteinander zu einem Systeme verbunden ist, alle diese Elemente in gegenseitiger Action und Reaction begriffen sind, und dass demzufolge jedem Element ein System innerer Zustände inhärirt, welches in bestimmter Weise modificirt werden muss, wenn das Gleichgewichtsverhältniss der miteinander in Wechselwirkung stehenden Elemente eine bestimmte Störung erfährt. Diese Modification wird zugleich mit dem bestimmten Bewegungszustande hervortreten, in welchen die Elemente durch die betreffende Störung versetzt werden.

Wenn nun Fechner*) sagt, dass die körperlichen Thätigkeiten, von welchen Empfindung und bewusste psychische Thätigkeiten überhaupt abhängen, nicht erst durch Anstoss an einen bestimmten Punkt des Körpers solche erwecken, sondern während ihres Vorganges in einer bestimmten Ausdehnung solche mitführen; so kann man billig fragen, wie man sich dies zu denken habe. Als ein unmittelbarer Ausdruck bestimmter Thatsachen kann dieser Satz nicht betrachtet werden, und die Erfahrungen, auf die er gestützt ist, lassen ohne Zwang noch eine anderweitige Deutung zu.

443. Reflectiren wir noch einmal auf den Ursprung einer bestimmten Sinnesempfindung, es sei eine Lichtempfindung, so wissen wir, dass sie entstehen kann durch die Einwirkung einer Aetherwelle auf die Retina des Auges. Indem die Aetherwelle die Elemente eines Retinastäbchens aus ihrer Gleichgewichtslage versetzt, gerathen dieselben in einen bestimmten inneren Zustand, der sich durch die betreffende Opticusfaser weiter fortpflanzt. Allein diesen Reizzustand betrachtet man noch nicht als die eigentliche Sinnesempfindung, sondern nimmt wohl allgemein an, dass derselbe, wenn sie entstehen soll, sich mindestens bis zu demjenigen Centraltheil fortpflanzen muss, in welchen der Sinnesnerv mündet. In diesem Centraltheil wird nun ebenfalls ein bestimmter Erregungszustand hervortreten, der, wenn er in allen oder doch in vielen Elementen, die den Centraltheil constituiren, zugleich vorhanden ist, insofern auch in einer bestimmten Ausdehnung vor-

*) Elemente der Psychophysik, T. II. S. 426.

kommt. In gleicher Weise verhält es sich mit den Reizzuständen, die von den übrigen Sinnesnerven in den zugehörigen Centraltheilen erregt werden. Wollte man nun wirklich diese Reizzustände der betreffenden Centraltheile schon als Sinnesempfindungen betrachten, so würde doch aus allen diesen Sinnesempfindungen noch nicht die Vorstellung Eines Dinges mit mehreren sinnlichen Merkmalen hervorgehen können; denn diese Vorstellung erfordert, wie wir schon anderwärts hervorgehoben haben, eine streng einheitliche Zusammenfassung der verschiedenen Sinnesempfindungen, die nur unter Voraussetzung eines gemeinsamen einfachen Trägers derselben denkbar ist, dessen Nothwendigkeit sich eben so sehr ergibt, wenn man auf den Zusammenhang der psychischen Erscheinungen überhaupt reflectirt. Die Zustände des Vorstellens, Begehrens und Fühlens sind sämmtlich intensive Zustände des Bewusstseins, die wir in unserer inneren Erfahrung auf's Innigste in gegenseitiger Durchdringung verbunden vorfinden, so dass gar oft die Vorstellung eines Objects zugleich mit einer bestimmten Begehrung und mit einem bestimmten Gefühle verknüpft ist, was, wie wir denken, nicht sein könnte, wenn der Zustand des Vorstellens in einem Element, und der des Begehrens und Fühlens wieder in anderen Elementen seinen Sitz hätte, und was eben so wenig möglich wäre, wenn diese geistigen Zustände in verschiedenen Theilen einer continuirlich ausgedehnten Substanz vereinzelt gelegen wären, wogegen das vorliegende Factum sehr wohl erklärt werden kann, wenn man die geistigen Zustände als Thätigkeiten eines und desselben einfachen Wesens betrachtet.

Es müssten nun, um auf unseren obigen Fall zurückzukommen, die Centraltheile der verschiedenen Sinnesnerven ihre inneren Reizzustände sich gegenseitig mittheilen, was natürlich nur durch die Vermittelung anderer Gehirntheile geschehen könnte, so dass die Träger der Lichtempfindungen auch zu Trägern der Gehörempfindungen u. s. w. würden; oder es müssten, was man vielleicht ansprechender finden möchte, die in den verschiedenen Centraltheilen erregten Reizzustände sich sämmtlich noch zu einem anderen Centralorgane fortpflanzen und hier erst, nämlich in dessen Elementen, als eigentliche Empfindungen auftreten. Insofern nun die verschiedenen Empfindungen in allen oder doch in vielen Elementen eines solchen Centralorgans in derselben Weise auftreten, kann man auch wieder sagen, dass diese Empfindungen, als psy-

chische Thätigkeiten, in einer bestimmten Ausdehnung vorkommen; und in diesem Sinne weiter fortschreitend möchte es auch in den übrigen Theilen des Nervensystems nicht an Elementen fehlen, die als Träger gewisser psychischen Zustände dienen könnten. Nothwendig würde es aber sein, dass die betreffenden Elemente jenes Centralorgans ihre inneren Zustände einander vollständig mittheilten, wenn die erfahrungsmässig gegebene Einheit des Bewusstseins nach dieser Ansicht überhaupt möglich sein soll. Es ist hier zu bedenken, was Herbart*) sagt: „Wollte man dem Menschen mehrere Seelen in Einem Leibe beilegen, so müsste man erstlich sich hüten, unter ihnen die geistigen Thätigkeiten vertheilt zu denken, vielmehr würden dieselben in jeder Seele ganz sein müssen; zweitens wäre alsdann die genaueste Uebereinstimmung unter diesen Seelen vorauszusetzen, so dass sie für völlig gleiche Exemplare einer Art gelten könnten." Wären nämlich die geistigen Thätigkeiten unter diesen Seelen vertheilt, so gäbe es für dieselben kein gemeinsames Bewusstsein, und bestände nicht die genaueste Harmonie unter allen diesen Seelen, so könnte schon die geringste Störung, welche die eine oder andere Seele in dem System ihrer inneren Zustände beträfe, die zweckmässige psychische Beherrschung des Leibes nicht minder wie die Einheit des Bewusstseins alteriren. Wahrscheinlich ist eine solche Ansicht nicht, und man wird sie im Vergleich zu der Ansicht, nach welcher es Ein Element als Träger des geistigen Lebens gibt und nach welcher die verschiedenen Glieder des Nervensystems theils als Zuleiter gewisser Reizzustände, theils als Vermittler und Regulatoren des leiblichen Lebens aufgefasst werden, um so weniger wahrscheinlich finden, je mehr man auf das Detail der psychischen Erscheinungen, insbesondere auch auf die Thatsachen des Selbstbewusstseins, erklärend eingeht.

444. Indessen, wenn man nicht ein einfaches Wesen als Träger aller psychischen Erscheinungen annehmen will, bleibt kaum noch eine andere Ansicht als die so eben besprochene übrig. Denn man kann doch nicht annehmen, dass gewisse Thätigkeiten (resp. Bewegungsverhältnisse) der Nerven- und Gehirnmolecüle die psychischen Thätigkeiten in bestimmter Ausdehnung so mitführen, dass diese letzteren ausser oder zwischen den Elementen

*) Lehrbuch zur Psychologie, S. 180 f.

des Gehirns schweben. Die psychischen Erscheinungen erfordern einen substantiellen Träger, als dessen Thätigkeiten sie gedacht werden müssen. Soll nun dieser Träger nicht eine einfache Substanz sein, die mit den Elementen des Gehirns und durch diese mit den Elementen des übrigen Nervensystems in Wechselwirkung steht und die Empfindungen nach ihrer eigenthümlichen Qualität in sich selbst erzeugt, so muss derselbe als eine zusammengesetzte Substanz gedacht werden. Die Zusammengesetztheit dieser Substanz könnte aber einmal in einer Vielheit miteinander verbundener Elemente bestehen, was auf die oben besprochene Ansicht zurückführen würde, wenn man als diese Elemente die Bestandtheile des Gehirns nimmt; oder man denkt sich statt dessen eine Substanz, die als selbstständiges continuirliches Ganze sich durch den Leib verbreitet. Wer eine solche Substanz annimmt, mag zusehen und angeben, wie man sich die Wechselwirkung zwischen ihr und den Elementen des Nervensystems zu denken habe. Wir können einer solchen Annahme nicht wohl beipflichten, weil wir uns, nach unserer naturwissenschaftlichen Ueberzeugung, die gesammte Natur aus einfachen Elementen (Atomen) zusammengesetzt denken müssen, die zunächst Molecüle (Massentheilchen) bilden und durch diese grössere Massen darstellen. Hiermit vermögen wir nun die Annahme einer einfachen Seelensubstanz sehr wohl in Einklang zu bringen, nicht aber die einer continuirlich durch den Leib verbreiteten Substanz, in der doch auch die psychischen Erscheinungen nicht vertheilt gedacht werden dürfen (S. 63 f.). Doch können auch wir in gewisser Beziehung ein ausgedehntes Seelenwesen annehmen. Wir können uns denken, dass die einfache Substanz, welche der Centralpunkt aller Sensationen ist und in der sich dieselben durch die mannigfachsten Verbindungen zu höheren psychischen Gebilden entfalten, noch ausser und neben den Nervenelementen mit einer grösseren Anzahl von Elementen besonderer Art verknüpft ist. Diese Elemente könnten nun zusammen ein grösseres Ganze darstellen, das sich im Gehirn, so weit als man will, und, wenn es beliebt, auch noch in den übrigen Körper, erstrecken mag, und dessen Elemente mit denen der Nerven, wenn diese von aussen oder innen erregt werden, zugleich in gewisse Bewegungsverhältnisse und innere Zustände gerathen mögen, die sich weiter zu der eigentlichen Seelensubstanz fortpflanzen. Ob mit einer solchen Annahme

etwas gewonnen wäre, ist eine andere Frage; wir führen dieselbe hier an, weil wir sie, von unserem Standpunkte aus, im Allgemeinen denkbar finden. Ihr möglicher Werth kann selbstverständlich nur mit Berücksichtigung bestimmter Thatsachen beurtheilt werden.

Die verschiedenen Ansichten aber, die man in Hinsicht auf den Träger des geistigen Lebens aufstellen kann, werden sich immerhin auf einige wenige Hauptansichten zurückführen lassen. Diese müssen nun, im Hinblick auf die ganze Fülle der gegebenen Erscheinungen, bis zu ihren letzten Consequenzen entwickelt werden; es wird sich dann finden, auf welcher Seite die Wahrheit liegt.

Sachregister.

A.

C.

D.

E.

F.

G.



H.

I.

K.

Q.

R.

S.



Druckfehler.

S. 32	Z. 18 v. o.	statt	*y* und *x*	l. *y* und *z*.
- 48	Z. 17 v. u.	-	$\frac{1}{r}+\frac{1}{e'}$	l. $\frac{1}{e}+\frac{1}{e'}$.
- 48	Z. 2 v. u.	-	*e* und *d*	l. *e* und *h*.
- 65	Z. 1 v. u.	-	vor	l. von.
- 131	Z. 8 v. o.	-	*b*	l. *b'*.
- 137	Z. 17 v. o.	-	insfern	l. insofern.
- 201	Z. 5 v. u.	-	den	l. die.
- 206	Z. 10 v. v.	-	weier	l. zweier.
- 212	Z. 6 v. o.	-	(*ch*, Fig. 107)	l. (*cc*, Fig. 107).
- 224	Z. 9 v. u.	-	hat man hinter „ist" einzuschalten: zu e reichen.	
- 247	Z. 8 v. o.	-	concentrirtes	l. centrirtes.
- 427	Z. 8 v. u.	-	die stark etc.	l. die grössere stark etc.



